

GLOBAL WARMING, AND ROLE OF SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIALS AND SUPERPLASTICIZERS IN REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM THE MANUFACTURING OF PORTLAND CEMENT

V.M. Malhotra

Scientist Emeritus, CANMET, Ottawa, CANADA

ABSTRACT: This paper discusses some aspects of global-warming, and the role of supplementary cementing materials and superplasticizers in reducing greenhouse gas emissions to the atmosphere. The data are presented as to the CO₂ emissions per capita per year from various countries. Also, the relative information is given on the availability of cement and supplementary cementing materials worldwide. The paper mentions very briefly the development of high-performance, high-volume fly ash (HVFA) concrete that incorporates large dosages of superplasticizers. The use of HVFA concrete can reduce very significantly the use of cement in concrete, thus contributing to the reduction in the greenhouse gas emissions. The paper is concluded by referring to the tradable emission rights, and the utilization of fly ash.

Keywords: CO₂ emissions, concrete, environment, fly ash, global warming, portland cement, supplementary cementing materials, sustainable development.

ACI Honorary Member V. Mohan Malhotra is Scientist Emeritus, International Centre for Sustainable Development of Cement and Concrete (ICON), CANMET, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada. He is a former member of the ACI Board of Direction and has served on numerous ACI and ASTM committees. He is a prolific author, editor, and researcher, and has received many awards and honours from the ACI, ASTM, and other institutions throughout the world.

“There was no bigger long-term question facing the global community than the threat of climate change”

Tony Blair, Prime Minister, U.K.
BBC News, June 17, 2004

“This world faces an economic and development catastrophe if the rate of global warming is not reduced”

Jennifer Morgan, Director
WWF=s Global Climate Change Program
BBC News, March 14, 2005

“We need to take urgent and informed action now if we are to avoid the worst impact of climate change”

Sir John Bond, HSBC Chairman
in a letter to British Prime Minister
that was signed by a dozen British and American companies
Globe & Mail, Toronto, CANADA, July 5, 2005

INTRODUCTION

The World Earth Summits in Rio de Janeiro, Brazil in 1992, and Kyoto, Japan in 1997 made it abundantly clear that for long-term sustainable development it is essential that the rate of greenhouse gas emissions must not be allowed to go on increasing. The term “sustainable development” has been defined by many people in many ways. As recorded at the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, U.S.A., the term Asustainable development@ has as many as 57 competing definitions*.However, most accepted definition is by the Norwegian Prime Minister Gro Harlem Bundtland: AThe ability of humanity to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs@.

The primary greenhouse gas emissions affecting the sustainable development are the carbon dioxide (CO₂) emissions. The other greenhouse gases of concern include nitrous oxide (NO_x) and methane (CH₄), but their amount emitted is relatively small compared with that of CO₂.

Apart from the U.S.A. and Australia, almost all other developed countries are placing mandatory quotas on the emission of these gases, and these involve stabilizing these emissions to 6% below the 1990 level by the year 2010-2012. As the manufacturing of portland cement contributes significantly to the CO₂ emissions, this paper emphasizes the increased use of large volumes of fly ash, other supplementary cementing materials and superplasticizers in the construction industry to reduce these emissions.

GLOBAL WARMING

CO₂ Emissions Per Capita Per Year by Different Countries

The U.S.A. and Canada are the largest contributors of CO₂ emissions in the world with CO₂ emissions estimated at approximately 20 tonnes per capita per year, followed by the EU countries at about 9 tonnes (Table 1). The developing countries like China and India have low emissions at present, but their rapid industrialization is going to increase the rate of emissions per capita significantly in the near future.

Table 1. CO₂ Emissions in Tonnes per Capita Per Year*

U.S.A.	20
Canada	20
EU	9
China	3
Latin America	3
India	1

**The numbers are approximations only, and have been collected from published information for the year 2004*

*Sanders, Doug, “Why Sustainable Development is Neither”, Globe and Mail, Toronto, Oct. 19, 2003.

Concentration of CO₂ in the Atmosphere

The concentration of CO₂ has been increasing steadily in the world since the industrial revolution in the 1800's. At the time of the industrial revolution, the concentration of CO₂ in the atmosphere was 260 ppm, in 1988 the concentration of CO₂ observed in Hawaii was 350 ppm. If no action is taken on global warming, the rate of concentration in the atmosphere is going to increase dramatically (Fig. 1).

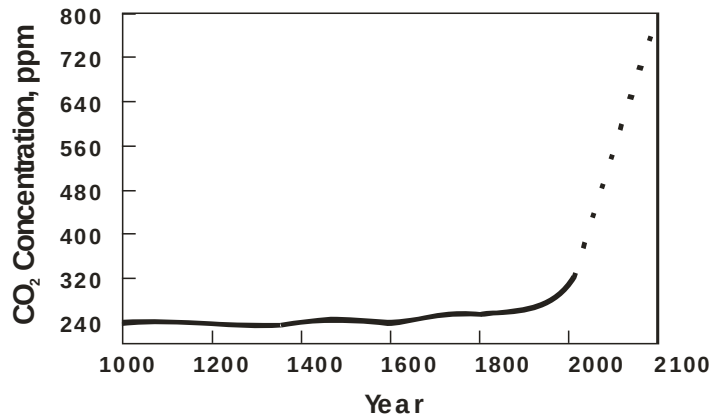


Figure 1. Concentration of CO₂ in the atmosphere since 1800's

Sequestration of Carbon Dioxide

Carbon dioxide sequestration involves techniques that capture GHG emissions so that they can be stored underground rather than be allowed to enter into the atmosphere. Unfortunately, sequestration is a very difficult technique, and has not been, to-date, demonstrated successfully - though research is being performed by some industrial companies. For the immediate future, sequestration of CO₂ is not very promising, and is not an option.

Absorption of CO₂ Emissions by the Oceans

The world's oceans have absorbed nearly half of the CO₂ emissions during the past 200 years. This amounts to nearly 118 billion tonnes of the CO₂ emissions since 1800's. This is the positive aspect. However, there are negative aspects of the phenomenon. Because as CO₂ dissolves in seawater, it triggers the formation of acids that can dissolve the shells and skeletons of marine animals and reduces their ability to produce calcium carbonate shells. This, in turn, can affect productivity of the oceans in terms of marine life and reefs.

GLOBAL TEMPERATURE RISE AND CLIMATE CHANGE

An increase in CO₂ emissions affects adversely the global climate. The Inter-governmental Panel on Climate Change (IPCC), meeting in Geneva, recently warned that the average global temperature is expected to rise between 1.4 and 5.8 °C over the next 100 years. Only seven years ago, the Panel had predicted a maximum temperature rise of 3.5 °C over the same period. It is of interest to note that the average global temperature has risen only 0.6 °C over the past 100 years.

Attempts have been made to determine a specific rise in Earth's average temperature that can cause unacceptable damage. The European Union's¹ scientific groups have set this threshold at 2.5 °C of additional rise in temperature from the current conditions. An international task force² under Senator Olympia Snow of the U.S.A. and Stephen Byers, a member of the U.K. Parliament, and consisting of scientists, business leaders and policy experts have also selected the above threshold of 2.5 °C beyond which major damages could occur.

Linearity and Ecology

Ecology is non linear¹. It may follow a straight line for a while, then it hits a point of no return, that is a threshold, and then it crashes. The recent collapse of the massive shelf ice in the Antarctic is the perfect example of this threshold concept. The scientific community knew that there were warming trends but could not foresee that more than five billion tonnes of Antarctic ice would crumble in a matter of months.

Retreating of Arctic Ice

A scientific commission consisting of scientists from eight countries including Canada and the U.S.A., have recently completed a four year study on the retreating of Arctic ice. The Commission has concluded that the retreat of Arctic ice and thawing of tundra are a direct result of the accumulating carbon dioxide and other emissions from human activities worldwide.

The recent collapse of the massive ice shelf of more than five billion tonnes, in the Antarctic is a perfect example of accelerating flows of ice to the sea with serious consequences of rise in sea levels. This can also lead to the potential of intensified droughts and floods.

World Leader in Global Warming

North America is the world leader in global warming as it can be seen from the following statistics:

- In 1998, the North American continent accounted for 25.8 per cent of the global emissions of carbon dioxide, a leading greenhouse gas.
- North American's per capita annual gasoline consumption for motor vehicles is nine times the global average.
- By 1996, the North American continent's impact on the environment also called the 'ecological imprint' has grown 4.4 times the world's average.
- North Americans burn an estimated 25.7 billion litres of fuel annually in traffic jams.²
- Canada and the U.S. consume 25 per cent of global energy used each year, despite having only about 5 per cent of the world's population.³
- Although today's cars are 90 per cent cleaner than those of the 1970's, U.S. drivers now drive on average twice as many kilometres as they did in the 70's. Also, automobile fuel efficiency gains have been offset by an 18-year old trend towards heavier cars such as SUVs.
- Total energy use in North America grew 31 per cent between 1972 and 1997.¹

^{1,2} International Herald Tribune, February 1, 2005

¹ Professor Eric Post, Penn. State University, Global & Mail, May 6, 2002

²⁻³ U.N. Report, Globe and Mail, August 15, 2002

¹⁻² U.N. Report, Globe & Mail, August 15, 2002

- Although the average U.S. family size has fallen 16 per cent, the size of new homes has risen 48 per cent, with resulting increase in energy use.²

Figure 2 shows the percentage of different greenhouse gas emission in the U.S.A. for the year 2002.

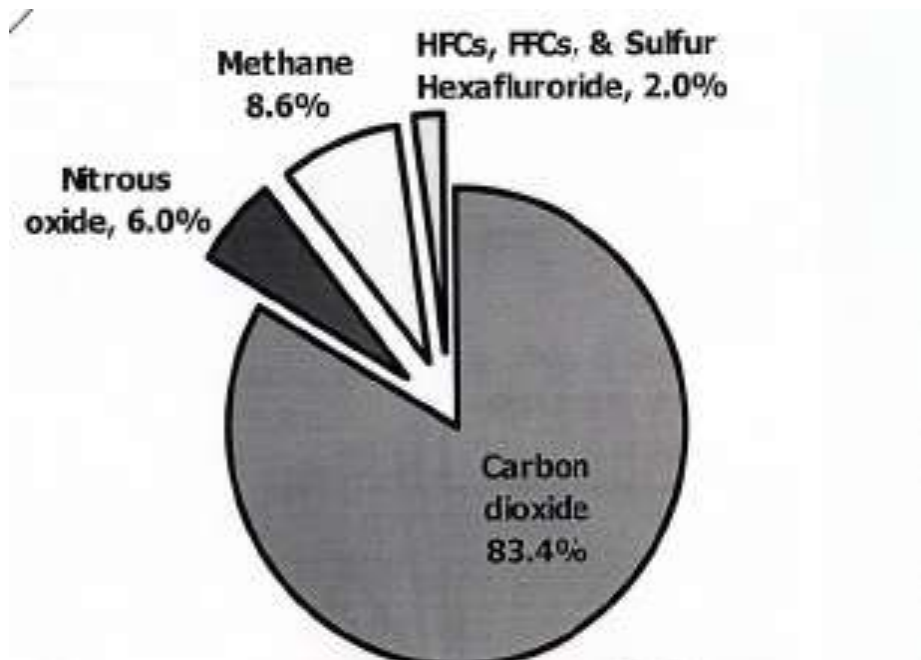


Figure 2. U.S. Greenhouse Emission, 2002
(U.S. Environmental Protection Agency)

CO₂ Emissions by Automobiles in the U.S.A.

Cars are the largest single source of CO₂ emissions into the atmosphere, and every litre of gasoline burned produces about 2.5 kg of CO₂. The average car getting 10.6 km/L (25 miles per gallon) and travelling 20,000 km (12,500 miles) per year emits about 4.7 tonnes of CO₂. Therefore, 20 million passenger cars (10 per cent of the total number of cars in the U.S.A.) will emit about 94 million tonnes of CO₂ into the atmosphere. This amount of CO₂ is about the same as emitted by the cement plants in the U.S.A.

Potential Impact of Global Warming

At present, there are no means of quantifying the potential effect of global warming. Different research groups involved in this area have different forecasts, and these range from gloomy to very gloomy. In general, they all agree that the following events are the most likely outcome of climate change:

1. Disappearance of glaciers that feed major river systems in south and south east Asia
2. Melting of the Antarctic glaciers
3. Melting of the permafrost in the north
4. Flooding that endangers coastal low-lying areas
5. Damaged ecosystem that endanger fisheries
6. Danger of very serious air pollution

7. Increased danger of insect-born diseases
8. Increased threat of forest fires and very serious floods
9. Forests turning to grasslands
10. Extremely serious shortages of water in parts of Africa and Asia

WATER – THE WORLD’S NEXT CRISIS!

Water Shortage

The global warming will affect very seriously the availability of water in the future. The Himalayan glaciers are melting fast. This could lead to water shortages for hundreds of millions of people. The glaciers that regulate the water supply to Ganges, Indus, Brahmaputra, Mekong, Thanklwin, Yantse and Yellow rivers are believed to be retreating at a rate of about 10 to 15 metres each year. It is estimated that 500 million people on the planet live in countries critically short of water, and by 2025, the above number will leap to 3 billion. According to the Pacific Institute for Studies in Development and Security, water shortages have risen in recent years across the southwest and northwest of the U.S.A. These have also occurred in India, China and Africa. As a result, some industrial plants had to close or had disruptions. For example, in 2004, in the southwest Indian state of Kerala, PepsiCo Inc. and Coco-Cola Co. plants were ordered closed amid drought-induced water shortages. Once again, the U.S.A. is the world leader in water usage as shown below:

Continent	Water Consumption, litres/day
North America	600
Europe	300
Africa	30

Water Wastage

In spite of the looming water crisis in the not too distant future, there is a huge wastage of water worldwide. For example, 9.5 billion litres of water it would take to support 4.76 billion people of their daily needs as set by the United Nations. On the other hand, currently 9.5 billion litres of water are being used to irrigate the world’s golf courses. Furthermore, there seems to be no end in sight for the building of new golf courses, especially in China and southeast Asia and, to a lesser extent, in India.

PORTLAND CEMENT AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS DURING ITS MANUFACTURING

Portland Cement Production

Ordinary Portland cement is a major construction material worldwide, and will remain so for the foreseeable future (Table 2). The net cement production is expected to rise from about 1.7 billion tonnes in 2000 to about 2 billion tonnes in 2010. (These figures can change depending upon the economy of the world). The major increases will take place in China and India, and to a lesser extent in the former Soviet Union. In the U.S.A., it is expected that the cement production will increase from about 100 million tonnes in year 2000 to about 130 million tonnes in 2010. In view of the huge tonnage involved, it is imperative that the manufacturing of cement be made as

environmentally friendly as possible Table 3 provides data on cement production, population and GDP of some selected countries.

Table 2. Regional and World Cement Production to Year 2010*
(million tonnes)

	1995	2000	2005	2010	% of	% of
European Union	168.1	187.9	194.1	189.3	12.1	9.4
Other parts of Europe	65.8	80.0	90.2	94.7	4.7	4.9
Former Soviet Union	58.1	80.3	110.1	128.2	4.2	6.6
North America	92.9	94.9	94.8	94.7	6.6	4.9
Central and South	89.4	106.6	127.4	145.0	6.4	7.5
Africa	64.8	74.3	80.7	85.5	4.6	4.4
Middle East	63.5	75.6	76.9	73.4	4.6	3.8
East Asia	623.4	732.7	798.8	844.3	44.6	43.4
S/SE Asia	161.2	219.1	255.0	279.2	11.6	14.4
Oceania	8.0	10.6	11.1	11.8	0.6	0.6
World Totals	1396.1	1662.1	1839.1	1946.1	100.0	100.0

*From: *World Cement Annual Review, World Cement, Vol. 28, No. 7, July 1997, pp. 3-60.*

Note: Recent published data indicate that the North American production had already exceeded 120 million tonnes in year 2002, and will reach 130 million tonnes in year 2010.

Table 3. Production of Cement/Population/GDP of Selected Countries - 2004*

Country	Production million/tonnes	Population millions	Amount - Cement per person, kg
CHINA	850	1299	654
INDIA	110	1065	103
U.S.A.	97	293	331
JAPAN	69	127	543
SOUTH KOREA	60	49	1224
RUSSIA	46	144	319
SPAIN	40	40	1000
BRAZIL	38	184	206

* From: *Professor Tang Mingshu, Nanjing University of Technology June 2005*

The Cement Industry's Sustainable Program* developed by the world Business Council for Sustainable Development (WBCSD) resulted in the 2002 "Agenda for Action". This industrial protocol was undersigned by the C.E.O.'s of the world's ten leading cement manufacturers. The "Agenda for Action" covers a five year period, and is directed at improving among other things, the following:

- Climate protection
- Fuels and raw materials
- Emission reductions
- Environmental impact

The Swiss global cement producer HOLCIM Ltd., a member of WBCSD, has taken a leading role in the cement industry in its response to sustainable development, and has pledged to reduce by 2010 specific net CO₂ emissions by 20% globally against the reference year 1990**.

Greenhouse Gas Emissions from the Manufacturing of Portland Cement

Not only is the manufacturing of portland cement highly energy intensive, it also is a significant contributor of the greenhouse gases. The production of one tonne of cement contributes about 1 tonne of CO₂ to the atmosphere, together with minor amount of NO_x and CH₄. Even though the amount of GHG other than CO₂, is small, these are much more damaging than the former. The relative damage index of different GHG is given below, with CO₂ taken as one:

CO ₂	1x
Methane	20x
Nitrons oxides	200 x
Flourine	15000 x

The total CO₂ emissions per tonne of cement can range from about 1.1 tonne of CO₂ from the wet processing plants to about 0.8 tonnes from a plant with precalcinators.

About half of the CO₂ emissions are due to the calcination of limestone and the other half are due to the combustion of fossil fuels. According to Cahn et al*, the emissions from the calcination of limestone are fairly constant at about 0.54 tonnes of CO₂ per tonne of cement; the emissions from the combustion depend on the carbon content of the fuels being used and the fuel efficiency.

Global Perspective

Globally, in 1995, the production of cement was about 1.4 billion tonnes, thus emitting about 1.4 billion tonnes of CO₂ to the atmosphere. According to world energy outlook 1995, issued by the International Energy Authority (IEA), the worldwide CO₂ emissions from all sources were 21.6 billion tonnes. Thus, the worldwide cement production accounts for almost 7 percent of the total

*World Cement, Vol. 34, No. 4, April 2003, p. 42.

** ACI Concrete International, Vol. 25, No. 3, March 2003, p. 16.

* Cahn, D. et al., "Atmospheric CO₂ and the U.S. Cement Industry", World Cement, Vol. 28, No. 8, August 1997, pp. 64-68.

world CO₂ emissions. From the projections made by the cement companies, this proportion is expected to remain steady in the next decade (Table 4). Notwithstanding the “Agenda for Action” of WBCSD, this implies that the cement companies are not expecting the emergence of major environmentally friendly cement manufacturing technologies in the immediate future.

Table 4. World-wide Cement Production and CO₂ Emissions

Year	Cement Production, billion tonnes	Total CO ₂ Emissions, billion tonnes	CO ₂ Contribution by cement industry, %
1995	1.4	21.6	7
2010	1.9	28-30	7

Note: Recently published data indicate that total CO₂ emissions have already reached 28 billion tonnes.

Developing Countries

The infrastructure needs of developing countries have led to huge increases in demand for portland cement (Table 5). This has led to the installation of a large number of new cement plants in China and India. For example, a new plant with a capacity of 2 million tonnes of clinker has just been commissioned in India,** and the plans are to double the capacity of this plant to 4 million tonnes per year in the near future, thus making it the world=s largest single clinker plant. Paradoxically, the above countries are also installing huge coal-fired power plants to supply electricity to meet the growing needs of the population and manufacturing industries. For example, it is anticipated that by year 2010, India will double the capacity of the electric power generation from what is being generated today, resulting in an increase in fly ash availability to about 160 million tonnes annually. In that year, the portland cement production is expected to reach 130 million tonnes. Table 6 presents current production and anticipated production for the world for portland cement, fly ash and other cementitious and pozzolanic materials. **It is evident from Table 6 that fly ash is and will remain the major supplementary cementing material for years to come. It is therefore important that we concentrate our major efforts for the increased use of fly ash in concrete.**

Table 5. Coal Ash Production and Utilization, 2004*

Country	Production	Utilization in Concrete
China	>600	>15

*The above data include fly ash, bottom ash, and slag. For every 100 tonnes of fly ash, there are approximately 25 tonnes of bottom ash and boiler slag. The above production and utilization rates have been taken from published data and personal communications. They are, at best, estimates only, and therefore the margin of error could be as high as 10 percent.

** Anantharaman, V.J., “India=s Largest”, World Cement, Vol. 33, No. 23, December 2002, pp. 53-56.

Table 6. World-wide Production (millions of tonnes)

	Cement	Fly Ash	Others*
Current Production	1600	900	20
Anticipated Year	3000	2000	>100

* slag, silica fume, natural pozzolans, rice-husk ash, metakaolin

Unfortunately, the much needed industrial developments in China and India are affecting adversely the environment in two ways. The installation of new cement plants is increasing substantially the CO₂ emissions, and the construction of very large capacity thermal power stations is resulting in huge amounts of fly ash and bottom ash becoming available that are not being recycled in any meaningful manner. Most of the fly ash is being dumped in lagoons, landfill sites and abandoned quarries. Thus, potentially valuable cementing resources are being wasted in precisely the countries that need it most to reduce the greenhouse gas emissions, and to make economical and durable concrete structures.

ROLE OF FLY ASH AND OTHER SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIALS IN REDUCING CO₂ EMISSIONS

As mentioned earlier, there are hardly any new technologies on the horizon that can reduce CO₂ emissions during the manufacturing of portland cement. This leads us to the conclusion that the answer lies in reducing the output of cement clinker, and the loss in clinker production to be overcome by the use of fly ash and other supplementary cementing materials such as blast-furnace slag and rice-husk ash.

Availability of Fly Ash

Based on the fragmented information available, the current annual production of fly ash is of the order of 900 million tonnes worldwide. The big producing countries are China, India, and the U.S.A.. In addition to this, there are millions of tonnes of fly ash that have been stockpiled over the years. It has been reported that in the U.K. alone, 120 million tonnes could be recovered from the stockpiles*. The Wisconsin Power, in Milwaukee, U.S.A. is already doing so**. The utilization rate of fly ash in concrete varies from country to country (Table 5). In the U.S.A., fly ash is used as a separately-batched material at concrete batch plants, where as in Europe and India, fly ash blended cements are being produced for use in concrete. Currently, most fly ash blended cements in India incorporate about 20 percent fly ash; however one company produces blended cement with about 30 percent fly ash.

Notwithstanding that coal-burning power plants produce huge amounts of CO₂ emissions, and are environmentally unfriendly, it should be kept in mind that for the foreseeable future, power needs of the world especially China, India and the U.S.A., will be met by the coal-burning power plants

*Sear Lindon, "The Future of Pulverized Fuel Ash Concrete", Concrete, Vol. 37, No. 2, 2003, pp. 50-51.

**Personal communication from Bruce Ramme, Wisconsin Power, Milwaukee, U.S.A.

because there are huge reserves of good quality coal available worldwide, and the power produced from these sources is still cheaper than from other sources. Figure 3 shows the projection of world coal use indicating that the coals use will increase from 5.5 billion tonnes in 2005 to about 7.0 billion tonnes in 2020. In 2002, the percentage of electricity generated by coal in the U.S.A. was 51 per cent and is believed that this will stay about the same by 2025 (Figure 4). To meet the additional electrical capacity planned (327,000 megawatts) in China, India and the U.S.A., these countries will need 562, 213 and 72 new coal-fixed plants by year 2012. Furthermore, in northern Europe, nuclear power plants are being phased out, and the reserves of natural gas worldwide are limited compared to that of coal. **Thus it can be safely stated that fly ash will be available in huge quantities for at least up to year 2050.**

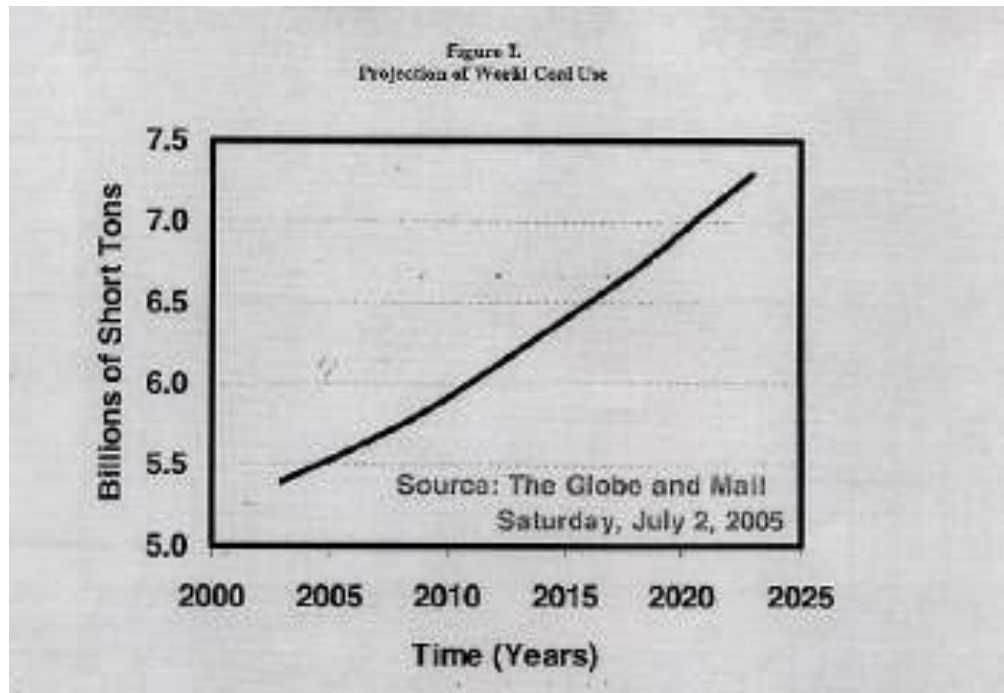


Figure 3. Projection of World Coal Use

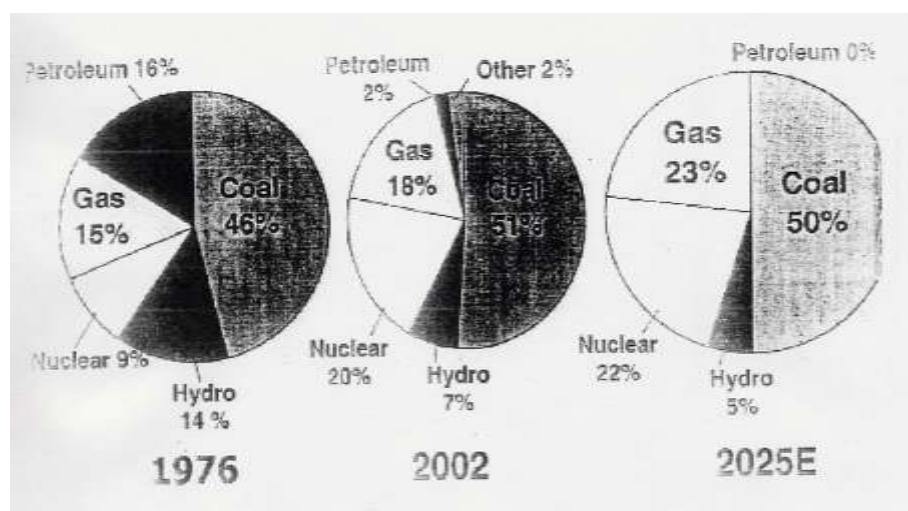


Figure 4. Percentage of Electricity for Fuel Type in the U.S.A.

The vast majority of the available fly ashes for use in concrete are low-calcium fly ashes (ASTM C 618, Class F), and are basically the by-product of burning anthracite or bituminous coal. These fly ashes, in themselves, possess little or no cementitious value, but will, in finely divided form and in the presence of moisture, chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds possessing cementitious properties. In recent years, high-calcium (ASTM C 618, Class C) fly ash is being marketed in the U.S., Canada, Poland, Greece, and some other countries. These fly ashes are by-products of burning lignite or sub-bituminous coal, and have cementitious properties in addition to being pozzolanic.

It should be mentioned that not all the available fly ash is suitable for use in concrete. However, technologies are available that can beneficiate those fly ashes that fail to meet the fineness and carbon content requirements, the two most important parameters of a fly ash for use with cement in concrete. These include removal of carbon by electrostatic and floatation methods. Grinding and air classification methods have been used to produce fly ash with high fineness.

High-Volume Fly Ash Concrete Technology

One of the major developments in the area of fly ash utilization in concrete has been the technology of high-volume fly ash (HVFA) concrete by Malhotra* and his associates at CANMET, Ottawa, Canada. It is believed that in years to come, this development will affect profoundly the use of cement in concrete. Several papers in this publication describe some case histories in the U.S.A., using HVFA concrete.

Other Supplementary Cementing Materials

In addition to fly ash, the other supplementary cementing materials that are available in large quantities and can be used to replace portland cement in concrete include granulated, blast-furnace slag, natural pozzolans, rice-husk ash, silica fume and metakaolin.

The worldwide production of granulated, blast-furnace slag is only about 25 million tonnes per year. The rice-husk is not yet available commercially, although the worldwide potential is about 20 million tonnes. The use of granulated blast-furnace slag in concrete has increased considerably in recent years, and this trend is expected to continue. Rice-husk ash, when it becomes available commercially, will along with fly ash and granulated blast-furnace slag, be the most significant supplementary cementing material for use as a partial replacement for portland cement in concrete to reduce CO₂ emissions. The use of natural pozzolans is rather limited because of their high-water demand when incorporated in concrete, and the need for calcination. Both Mexico and Turkey produce portland/pozzolanic cements with cement replacement levels of about 30 percent.

Silica fume, a highly pozzolanic material, is a by-product of when silicon metal or ferro silicon alloys are produced in smelters using electric arc furnaces. The world-wide production is estimated to be about 2 million tonnes. Its primary use is to enhance the durability of concrete by making it less permeable. It is normally not used as a cement replacement material but is added to the

*Malhotra, V.M., and Mehta, P.K., "High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportions, Construction Practice, and Case Histories", 2002, 101 pp., (Available from: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, K1Y 2B3).

concrete mixture in addition to portland cement. Thus its contribution to CO₂ emission reduction is indirect because durable structures require less repair and maintenance. The performance of metakaolin in concrete is like that of silica fume, but as metakaolin is a manufactured product, unlike silica fume which is a by-product, its use in concrete contributes very little to reduction of greenhouse gas emissions. No data have been published on the amount of metakaolin available, but it is believed to be of the same order as silica fume.

Limestone fillers are being used increasingly in Europe in the clinkering and grinding phase of portland cement production; however, these have not made any significant inroads in North America because those are not by-product materials and there are concerns as to the long-term durability of concrete incorporating these fillers.

ROLE OF SUPERPLASTICIZERS IN REDUCING CO₂ EMISSIONS

There are two possible ways in which superplasticizers can be used to reduce cement content in mixture proportioning, and thus contribute to CO₂ emissions reduction. These are:

- (a) To produce concrete with very low water-to-cement ratio. To achieve high-strength concrete, the water content of the mixture is reduced while maintaining the same cement content. The reduced workability is compensated for by incorporating superplasticizers. By this method, water reductions of up to 30% have been achieved, and concrete with water-to-cement ratio as low as 0.28 has been successfully placed. Thus, high performance, high-strength concrete can be made without increasing the cement content.
- (b) To produce concrete with reduced cement content. Superplasticizers can be used to produce concrete with reduced cement content while the water-to-cement ratio is maintained constant. As in method (a), the decrease in workability of concrete is compensated for by incorporating superplasticizers.

As mentioned earlier, superplasticizers are a vital component of HVFA concrete in which more than 50 percent of portland cement can be replaced by fly ash while still maintaining or increasing the strength and durability characteristics of concrete.

GLOBAL TRADE IN FLY ASH

Until recently, portland cement was indigenously produced in every country and there was very little international trade in this product. However, with the advent of large multinational cement companies, the portland has become an internationally traded product. For example, the U.S.A. imports cement from a large number of countries including Mexico, Canada, and Spain. During the years 2002 and 2004, the U.S.A. was importing between 15 and 20 million tonnes of cement per year. Similarly fly ash is becoming an internationally traded product. South Africa and India are exporting some fly ash to the middle east and there is considerable trade in fly ash among European countries. It is not unrealistic to assume that in the foreseeable future, like portland cement, large volumes of fly ash would be traded internationally for use in concrete.

TRADEABLE EMISSION RIGHTS AND THE UTILIZATION OF FLY ASH

“Tradeable emissions” refers to the economic mechanisms that are expected to help countries worldwide meet the stringent emission reduction targets established by the 1997 Kyoto Protocol.

It is being speculated that in the not too distant future one tonne of emissions will have a trading value of about \$40 (U.S.), the current value being \$25.00 (U.S.). Thus, for example, if a country can replace 50 percent of cement utilization by fly ash or slag, the country would have saved about 50 percent of the CO₂ emissions from reduced need for cement. For a country that produces 100 million tonnes of cement annually, this 50 percent replacement by fly ash would amount to savings in CO₂ emissions of 50 million tonnes. This, in turn, translates into a trading value of 1,250 million dollars (U.S.) annually. One must keep in mind that the value of the trading of emission rights can fluctuate widely. However, given the political and environmental pressures, the utilization of fly ash will pay rich dividends. The developed countries have a major stake in this issue. If these countries can transfer fly ash utilization technology to developing countries, and demonstrate the actual reduction in the installation of new cement plants in these countries, the former countries can rightly claim CO₂ emission credits.

Canada has approved the Kyoto Protocol to cut the greenhouse gas emissions to 6 percent below 1990 levels by year 2010-2012. In order to give an idea of huge financial stakes involved, it is estimated that it will cost about \$100 billion over 15 years for Canada to cut greenhouse gas emissions by as much as it promised at the Kyoto climate change conference.

HOW THE CEMENT AND CONCRETE INDUSTRY CAN CONTRIBUTE TO REDUCTION OF CO₂ EMISSIONS

There are a number of ways by which the cement and concrete industry can contribute towards reducing CO₂ emissions. Some of these are:

- Use less portland cement
- Use more supplementary cementing materials
- Use less unit water content by using more water reducers and superplasticizers
- Incorporate recycled aggregates in concrete
- Use stainless steel reinforcement in critical parts of structures to make them more durable
- Where possible, specify strength acceptance criteria on 56 or 91 days instead of 28 days
- Use lightweight concrete where possible

CONCLUSIONS

Environmental issues associated with the CO₂ emissions from the production of portland cement demand that supplementary cementing materials in general, and fly ash, ground granulated blast-furnace slag and rice-husk ash in particular, be used in increasing quantities to replace portland cement in concrete. Given the almost unlimited supply of good quality fly ash worldwide, and the development of technologies such as high-volume fly ash concrete, it is proposed that the installation of new cement plants should be avoided as much as possible. In addition, the ageing portland cement plants should be phased-out, and the resulting loss in capacity should be compensated for by the use of supplementary cementing materials.

The combined use of superplasticizers and supplementary cementing materials can lead to economical high-performance concrete with enhanced durability. It is hoped that the concrete industry would show leadership and resolve, and make contributions to the sustainable development of the industry in the 21st century by adopting new technologies to reduce the emission of the greenhouse gases, and thus contribute towards meeting the goals and objectives of the 1997 Kyoto Protocol.

The following quotation¹ from Dr. David King, Chief Science Advisor, Government of the U.K. is an appropriate concluding statement:

“Climate Change was a far grater threat to the world than international terrorism”

¹ BBC News, U.K. Edition, January 2004

**ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΑΣΒΕΣΤΟΥΧΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ
ΜΕ Η ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟ
α) Αντοχή σε θλίψη, διάρρηξη και CBR**

Σ. Κόλιας, Α. Καραχάλιος

*Εργαστήριο Οδοποιίας, Σχολή πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773,
Ζωγράφου, Αθήνα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Εξετάστηκε η δυνατότητα σταθεροποίησης τριών ειδών αργιλικών εδαφικών υλικών (CL,CH,OL) με διάφορα ποσοστά ιπταμένης τέφρας ή και τσιμέντου. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν ήταν (α) τα Όρια Atterberg (β) τα αποτελέσματα της δοκιμής συμπίκνωσης Proctor (γ) η αντοχή σε (ανεμπόδιστη) θλίψη σε 7, 28 και 90 ημέρες (δ) αντοχή σε εφελκυσμό (ε) η τιμή CBR σε 90 ημέρες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πολύ ενθαρρυντικά για ορισμένα είδη αργίλων. Συγκεκριμένα, ανάλογα με το ποσοστό του σταθεροποιητή παρουσιάσθηκε μείωση του ορίου υδαρότητας (LL) και αύξηση του ορίου πλαστικότητας (PL), αύξηση της βέλτιστης υγρασίας για συμπίκνωση, μείωση της μέγιστης ξηρής πυκνότητας, αύξηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, αύξηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό από διάρρηξη και αύξηση της τιμής CBR.

Λέξεις κλειδιά: ασβεστόχος ιπτάμενη τέφρα (ακατέργαστη), σταθεροποίηση αργιλωδών εδαφών, τσιμέντο, αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμός σταθεροποιημένων αργιλωδών εδαφών, CBR σταθεροποιημένων εδαφών

STABILIZATION OF FINE CLAY SOILS WITH HIGH CALCIUM FLY ASH AND WITH OR WITHOUT CEMENT

a) compressive and tensile strength and CBR

S. Kolias, A. Karahalios

*Highway Engineering Laboratory, School of Civil Engineering, NTUA 5 Iroon Polytechniou str.
15773 Athens*

ABSTRACT: In this study the effectiveness of using high calcium fly ash (with or without cement) as a chemical stabilizer for three different fine-grained clay soils (CL, CH, OL) was investigated. The parameters, which were examined, were Atterberg limits, optimum moisture content and maximum dry density for standard compaction test, compressive strength, cylinder splitting strength and CBR. The results of this research are promising since considerable upgrading of soils may be achieved enabling the use of the stabilized soils as improved sub-grades/capping layers or subbases for pavements. More specifically the results show that with increased percentages of fly ash a) plastic limit increases and liquid limit decreases, b) optimum moisture content increases and maximum dry density decreases c) uniaxial compressive strength at 7,28 and 90 as well as cylinder splitting strength and CBR increase.

Keywords: high calcium fly ash, stabilization of fine-grained soils, cement compressive, tensile strength of stabilized soils, CBR of stabilized soils

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην ανακοίνωση αυτή παρουσιάζεται μέρος των αποτελεσμάτων ευρύτερης εργαστηριακής έρευνας [Καραχάλιος 2000] που αφορά τις δυνατότητες σταθεροποίησης με ιπτάμενη τέφρα.

ΥΛΙΚΑ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της μελέτης αυτής είναι:

Εδαφικά υλικά

Χρησιμοποιήθηκαν τρία εδαφικά υλικά τα οποία χάριν συντομίας ονομάστηκαν Άργιλος Ι, Άργιλος ΙΙ και Άργιλος ΙΙΙ με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών

Εδαφικό υλικό	LL	PI	% < 75μ	AASHTO	UCS
Άργιλος Ι	38	18	51	A-6	CL
Άργιλος ΙΙ	53	30	83	A-7-6	CH
Άργιλος ΙΙΙ	43	25	90	A-7-6	OH

Ιπτάμενη Τέφρα

Χρησιμοποιήθηκε Ιπτάμενη Τέφρα (ΙΤ) από τον Α/Σ Καρδιάς και αντιπροσωπεύει την παραγωγή τέφρας του σταθμού κατά την διάρκεια μίας τυπικής εβδομάδας για τα δύο δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν. Τα δείγματα που συλλέχθηκαν ανά ημέρα αναμίχθηκαν καλά και στο τέλος δημιουργήθηκαν δυο ομογενή υλικά που στο εξής θα καλούνται ιπτάμενη τέφρα Ι και ιπτάμενη τέφρα ΙΙ. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των δύο δειγμάτων της τέφρας είναι η υψηλή περιεκτικότητα σε άσβεστο (45-49%). Η χημική σύσταση της ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 2 : Χημική ανάλυση δειγμάτων ΙΤ Καρδιάς

ΙΤ	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	Al ₂ O ₃ %	SO ₃ %	Απώλεια πύρωσης	Ελεύθερη άσβεστος
I	19,9	5,72	3,65	48,97	0,6	0,45	9,26	7,,25	3,01	18,31
II	25,24	5,08	4,23	44,77	0,28	0,69	10,20	6,49	-	-

Τσιμέντο

Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου ΙΙ 35.

ΟΡΙΑ ATTERBERG

Εκτός των δοκιμών προσδιορισμού των ορίων Attemberg στα εδαφικά υλικά στην φυσική τους κατάσταση, έγιναν δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Attemberg σε μίγματα εδαφικού υλικού και ιπταμένης τέφρας, με περιεχόμενα ποσοστά 5,10 και 20% κατά ξηρό βάρος εδαφικού υλικού. Η προσθήκη ιπταμένης τέφρας στα συγκεκριμένα εδαφικά υλικά τα μετέτρεψε σε μη πλαστικά σε χρονικό διάστημα 24 ωρών (αύξηση ορίου πλαστικότητας, μείωση ορίου υδαρρότητας). Το χρονικό διάστημα των 24 ωρών είναι πρακτικά ο απαιτούμενος εκείνος χρόνος για την ομογενή κατανομή του νερού στην μάζα του εδαφικού υλικού και για την εκκίνηση όλων των χημικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την ενυδάτωση της ιπταμένης τέφρας (σβέση της ασβέστου, ποζολανική αντίδραση κ.λ.π.) και για την ανταλλαγή ιόντων για τον μετασχηματισμό του εδάφους.

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η διαδικασία της παρασκευής δοκιμίων περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια: α) Ξήρανση του εδαφικού υλικού με την χρήση κλιβάνου σε θερμοκρασία μέχρι 70 °C. β) Θρυμματισμό των συσσωματωμάτων. γ) Κοσκίνισμα του θραυσθέντος εδαφικού υλικού με την χρήση του κόσκινου Νο 4. δ) Καθορισμό των αναγκαίων ποσοτήτων των υλικών για την δημιουργία των σωστών μιγμάτων και ανάμιξη αυτών. Σε μία προσπάθεια επίτευξης ομοιογενέστερης ανάμιξης η Ι.Τ. προαναμιχθηκε με το νερό και στη συνέχεια το μίγμα αναμιχθηκε με το εδαφικό υλικό όπως εφαρμόζεται συχνά στις σύγχρονες μεθόδους επιτόπου αναμίξεως σταθεροποιητών σε μορφή σκόνης για περιβαλλοντικούς λόγους. ε) Αναμονή 24-ωρών για την ανάπτυξη της αρχικής δράσης της ιπταμένης τέφρας καθώς και για την ομοιόμορφη κατανομή της υγρασίας σε όλη τη μάζα του εδαφικού υλικού. στ) Τελική ανάμιξη του μίγματος και σύνθλιψη (με τα χέρια) των συσσωματωμάτων έτσι ώστε τα δοκίμια που θα κατασκευαστούν να έχουν την ίδια περίπου σύσταση και πυκνότητα. Κατά την φάση αυτή αναμιγνύεται το τσιμέντο σε περίπτωση παρασκευής μίγματος με συνδυασμό Ι.Τ. και τσιμέντου. ζ) Ζύγιση των αναγκαίας ποσότητας εδαφικού μίγματος. η) εισαγωγή του μίγματος μέσα στο τύπο, συμπίκνωση και εξόλκευση του δοκιμίου. θ) Συντήρηση των δοκιμίων.

Τα κυλινδρικά δοκίμια (λόγος ύψους προς διάμετρο 1:2) παρασκευάστηκαν έτσι ώστε να έχουν προκαθορισμένη πυκνότητα ίση προς τη μέγιστη της αντίστοιχης δοκιμής συμπίκνωσης. Η παρασκευή έγινε σύμφωνα με το πρότυπο BS 1924 § 5.12 με την διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν απολύτως κυλινδρικά δοκίμια αντί των ελαφρώς κωνικών δοκιμίων που προβλέπονται στο BS.

Η συντήρηση των δοκιμίων έγινε με την περιτύλιξη τους σε πλαστική μεμβράνη (μαγειρική) και με την εισαγωγή τους μέσα σε θάλαμο συντηρήσεως όπου οι συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας είναι σταθερές (RH=91-95%, T=20-25°C).

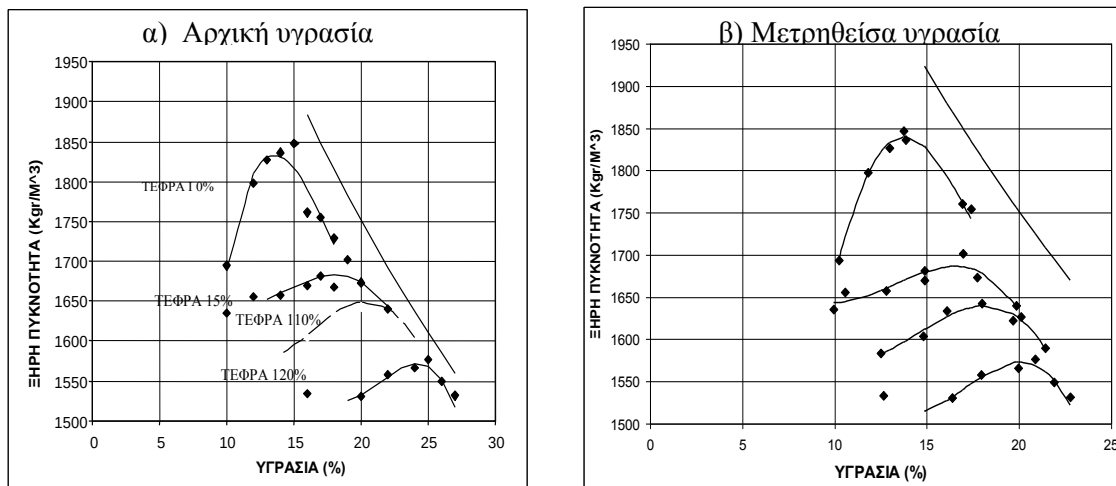
Οι δοκιμές έγιναν σε ηλικίες 7,28 και 90 ημερών. Το άνω όριο των 90 ημερών επιλέχθηκε διότι στο χρόνο αυτό αναμένεται να έχει συντελεστεί στο μεγαλύτερο ποσοστό η χημική δραστηριότητα που αναπτύσσεται μέσα στο μίγμα λόγω της δράσεως της Ι.Τ.. Τα παραπάνω χρονικά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την ανάμιξη του μίγματος εδαφικού υλικού, ιπταμένης τέφρας και νερού.

ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ –ΠΡΟΤΥΠΗ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής συμπίκνωσης για το πρώτο υλικό (άργιλος Ι) παρουσιάζονται στα σχήματα 1(α,β). Ανάλογα αποτελέσματα παρουσίασαν και τα άλλα εδαφικά υλικά.

Για τις δοκιμές αυτές γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- παρατηρείται διαφορά μεταξύ της αρχικής υγρασίας που προστέθηκε στο εδαφικό μίγμα και στην υγρασία που μετρήθηκε στο εδαφικό μίγμα μετά το πέρας της δοκιμής, όπως ακριβώς ορίζει και το αντίστοιχο πρότυπο (ASTM D 698-78). Δεδομένου ότι είχαν ληφθεί όλα τα αναγκαία μέτρα για την αποφυγή της εξατμίσεως (ανάμιξη και παραμονή σε πλαστική σακούλα για 24 ώρες κ.λ.π.) η μεταβολή αυτή θα μπορούσε να αποδοθεί στη χημική δέσμευση νερού λόγω της δράσης της ιπταμένης τέφρας
- Παρατηρείται αύξηση της βέλτιστης υγρασίας και μείωση της μέγιστης ξηρής πυκνότητας σε σχέση με το περιεχόμενο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με τα αντίστοιχα διαγράμματα υγρασίας πυκνότητας σε περίπτωση σταθεροποιήσεως με υδράσβεστο και είναι ενδεικτικά της ανάλογης προς την υδράσβεστο δράσης της Ι.Τ. λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας της σε άσβεστο



Σχ. 1: Αποτελέσματα της πρότυπης δοκιμής συμπίκνωσης Άργιλος Ι α) αρχική υγρασία β) μετρηθείσα υγρασία

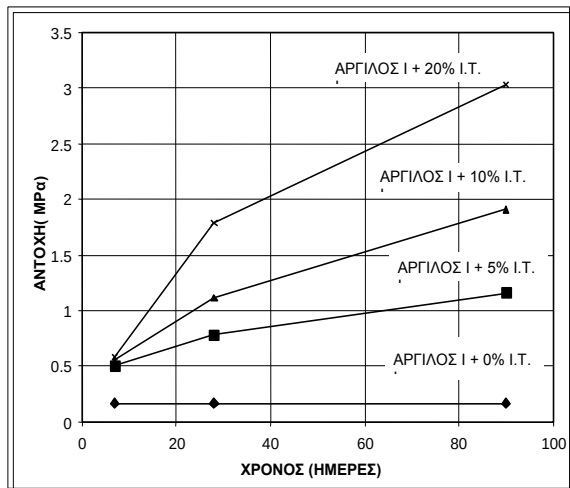
ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μονοαξονική θλίψη

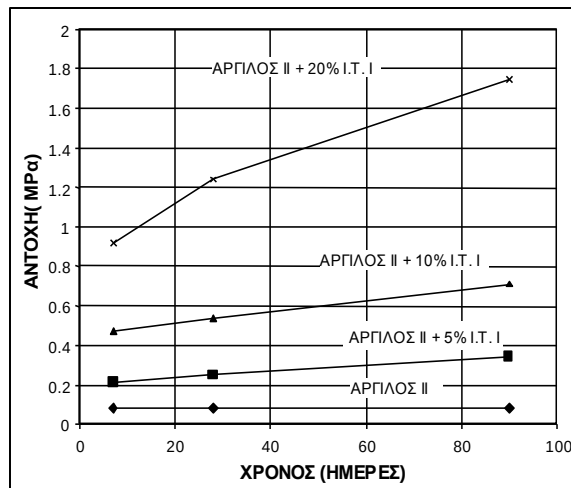
Η δοκιμή σε θλίψη έγινε σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 50mm και ύψους 100mm με ποσοστά ΙΤ 5, 10 και 20% κ.β. ξηρού υλικού σε ηλικία 7, 28 και 90 ημερών. Τα αποτελέσματα

παρουσιάζονται στα Σχήματα 2, 3 και 4. Εξετάστηκε επίσης και η επίδραση της χρησιμοποίησης τσιμέντου είτε ως μοναδικού σταθεροποιητικού μέσου (Αργίλος ΙΙΙ) είτε σε συνδυασμό με Ι.Τ. και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5, 6 και 7 .

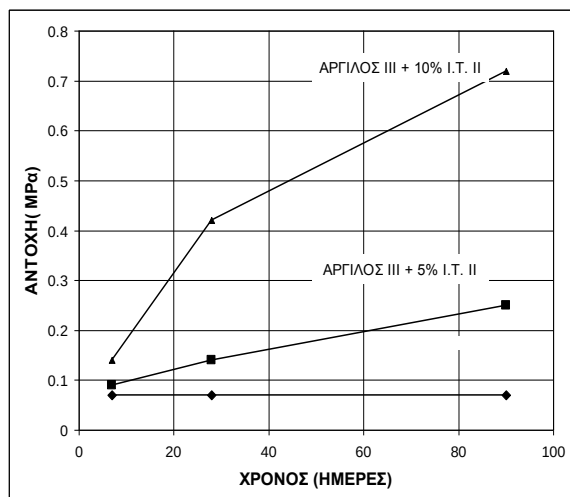
Παρατηρείται γενικά ότι τα τρία είδη εδαφικών υλικών παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές στην αντοχή σε θλίψη τόσο για την περίπτωση χρήσης ΙΤ όσο και για χρήση συνδυασμού ΙΤ και τσιμέντου.



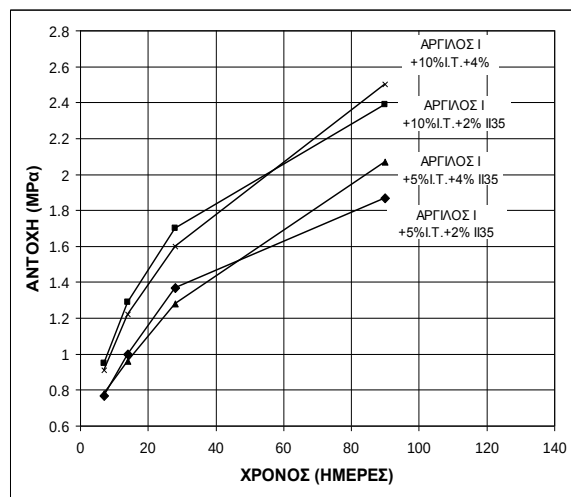
Σχ. 2: Θλιπτική αντοχή μιγμάτων Αργίλου Ι



Σχ. 3: Θλιπτική αντοχή μιγμάτων Αργίλου ΙΙ



Σχ. 4: Θλιπτική αντοχή μιγμάτων Αργίλου ΙΙΙ



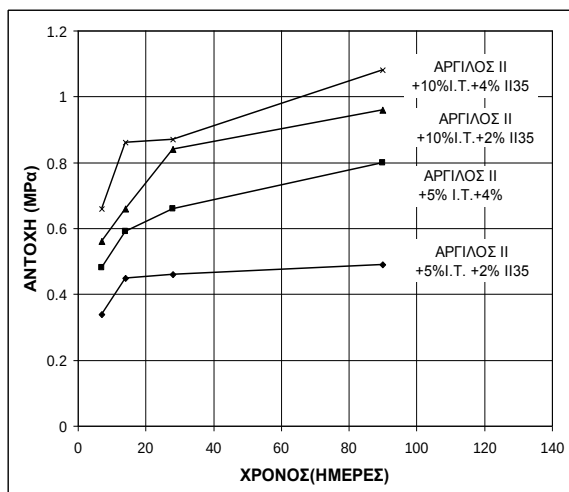
Σχ. 5: Θλιπτική αντοχή σε μίγματα Αργίλου Ι, ΙΤ και τσιμέντου

Για την περίπτωση χρήσης μόνον Ι.Τ. η κατάταξη των εδαφών από απόψεως αντοχής (αντίδρασης με την ΙΤ) είναι: Αργίλος Ι, Αργίλος ΙΙ, Αργίλος ΙΙΙ. Η Αργίλος Ι αποκτά αντοχές που υπερβαίνουν το συνήθως εφαρμοζόμενο όριο των 1.7 MPa [PCA] με ποσοστά από 10% ΙΤ και άνω ενώ η

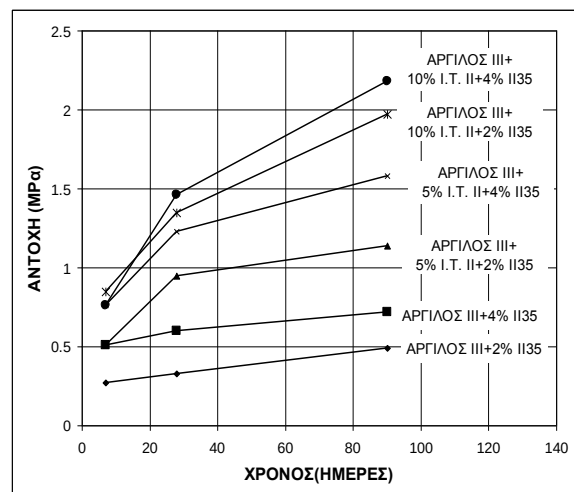
Άργιλος II χρειάζεται 20% ΙΤ και η Άργιλος ΙΙΙ δεν ικανοποιεί την απαίτηση αυτή ούτε με 20% Ι.Τ. Σημειώνεται ότι η Άργιλος Ι με 20% ΙΤ ικανοποιεί το κριτήριο της κυβικής αντοχής των 3,0 ΜΡα των Βρετανικής πρακτικής [TRL-road note 31, Sherwood] για σταθεροποιημένες βάσεις με τσιμέντο. Για σταθεροποιημένες υποβάσεις οι απαιτήσεις σε αντοχή [Dallas] 0.7ΜΡα σε 28 ημέρες ικανοποιούνται από την Άργιλο Ι για 10% Ι.Τ. και για την Άργιλο ΙΙ για εκτιμώμενο ποσοστό 15% Ι.Τ.

Εντούτοις, η βελτίωση ως προς την αντοχή σε θλίψη και των τριών εδαφικών υλικών είναι φανερή γεγονός που καθιστά την χρήση των σταθεροποιημένων εδαφών ως υλικών στρώσης έδρασης οδοστρωμάτων (βελτιωμένο υπέδαφος οδοστρωμάτων) όχι μόνο εφικτή αλλά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα οικονομικά λόγω της συνεπαγόμενης μείωσης του απαιτούμενου πάχους οδοστρώματος υπό την προϋπόθεση ότι θα ικανοποιούνται και μερικές πρόσθετες απαιτήσεις (απομένουσα αντοχή σε θλίψη μετά από υδρεμποτισμό, τιμή CBR).

Παρατηρείται επίσης ότι σε αντίθεση με τις περιπτώσεις σταθεροποίησης με υδράσβεστο στις οποίες η αντοχή πέραν ενός ορίου παύει να αυξάνει στην περίπτωση της ιπτάμενης τέφρας τέτοιο όριο δεν παρατηρήθηκε τουλάχιστον μέχρι 20% Ι.Τ.



Σχ. 6: Θλιπτική αντοχή για συνδυασμό ΙΤ και τσιμέντου. Άργιλος ΙΙ



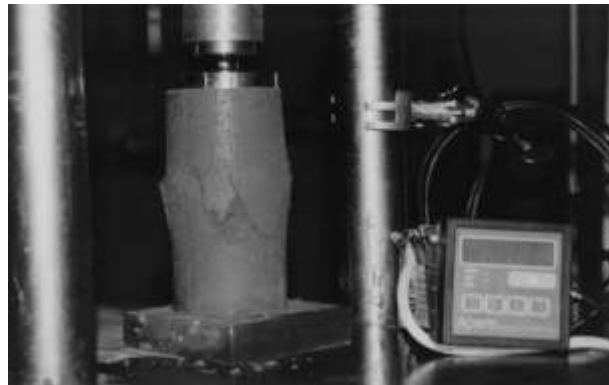
Σχ. 7: Θλιπτική αντοχή για συνδυασμό ΙΤ και τσιμέντου. Άργιλος ΙΙΙ

Για την περίπτωση συνδυασμού Ι.Τ. και τσιμέντου παρατηρείται σημαντική αύξηση της αντοχής τόσο σε μικρή ηλικία (όπως θα έπρεπε να αναμένεται) όσο και σε μεγάλη ηλικία. Η αύξηση αυτή κυμαίνεται περίπου: για την Άργιλο Ι από 25% έως 60 %, για την Άργιλο ΙΙ από 28% έως 128% και για την Άργιλο ΙΙΙ από 160% έως 500%. Επισημαίνεται ότι η μεγαλύτερη ποσοστιαία βελτίωση παρατηρείται στην Άργιλο ΙΙΙ, εδαφικό υλικό με την μικρότερη αντίδραση σε σταθεροποίηση με Ι.Τ. Είναι φανερό ότι με κατάλληλο συνδυασμό ποσοστών τέφρας και τσιμέντου τόσο η Άργιλος ΙΙ όσο η Άργιλος ΙΙΙ μπορούν να σταθεροποιηθούν σε ικανοποιητικό βαθμό για χρήσεις σε στρώσεις υπόβασης. Η εργασία αυτή περιελάμβανε επίσης την εξέταση της επίδρασης του τσιμέντου στην Άργιλο ΙΙΙ, καίτοι πρακτικά η σταθεροποίηση με τσιμέντο δεν μπορεί επιτευχθεί λόγω αδυναμίας ομογενούς αναμίξεως του τσιμέντου μέσα στο πλαστικό εδαφικό υλικό.

Από το Σχ. 7 φαίνεται πράγματι ότι παρ' όλη την επιμελημένη εργαστηριακή ανάμιξη οι αντοχές με 2% ή 4% τσιμέντο είναι πολύ μικρές. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται η επίδραση του υδρεμποτισμού στην αντοχή σε θλίψη για τις Αργίλους Ι και ΙΙ, δεδομένου ότι ανάλογα με την θέση που θα καταλάβει η σταθεροποιημένη στρώση και τις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής θα πρέπει να εξετάζεται και η επίδραση του υδρεμποτισμού.

Πίνακας 3: Επίδραση υδρεμποτισμού στη θλιπτική αντοχή

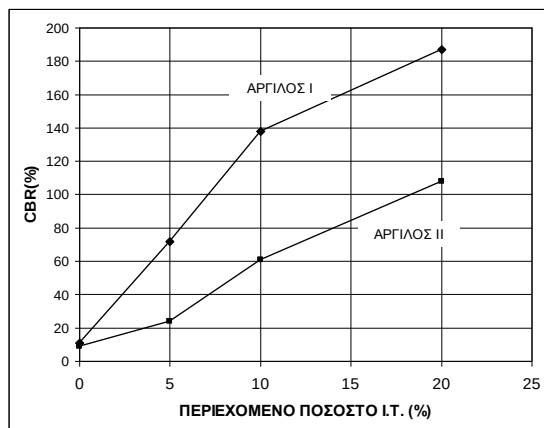
Εδαφικό υλικό	Ι.Τ. (%)	Απομένουσα Αντοχή (MPa)	Ποσοστό (%)
Αργίλος Ι	5	0,95	81,9
	10	1,79	93,7
	20	2,79	92,1
Αργίλος ΙΙ	5	0,16	47,1
	10	0,54	76,1
	20	1,42	83,0



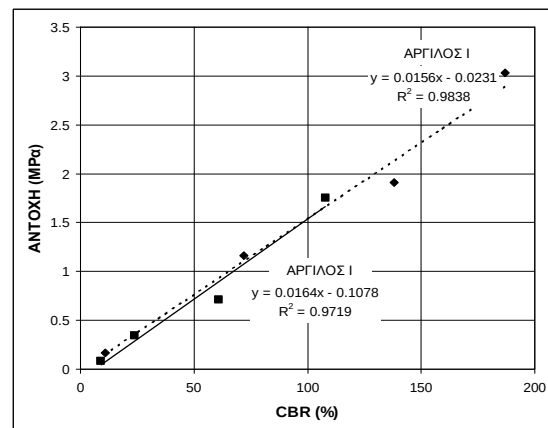
Σχ. 8: Θράυση δοκιμίου σε μονοαξονική θλίψη

Καλιφορνιακός λόγος φέρουσας ικανότητας CBR

Το CBR προσδιορίστηκε για τα εδαφικά υλικά Αργίλος Ι και Αργίλος ΙΙ, για ποσοστά ιπταμένης τέφρας 5%, 10% και 20% και ηλικία δοκιμίων 90 ημερών και μετά από υδρεμποτισμό 7 ημερών. Τα αποτελέσματα του CBR παρουσιάζονται στο Σχήμα 9. Είναι φανερό ότι οι τιμές του CBR παρουσιάζουν μία αξιοσημείωτη αύξηση ήδη από ποσοστά Ι.Τ. που υπερβαίνουν το 5% γεγονός που επιβεβαιώνει την δυνατότητα σημαντικής μείωσης του απαιτούμενου πάχους οδοστρώματος.



Σχ. 9: Τιμές CBR για μίγματα 90 ημερών

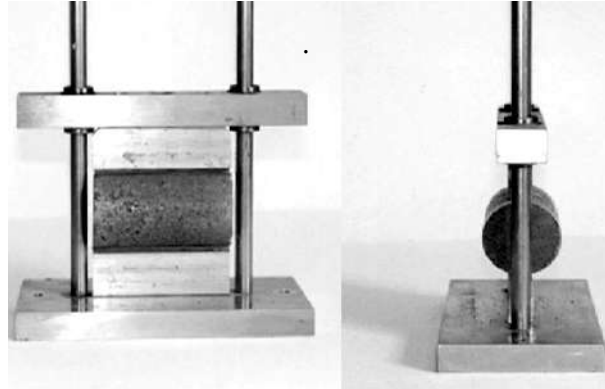


Σχ. 10: Συσχέτιση αντοχής σε θλίψη και CBR

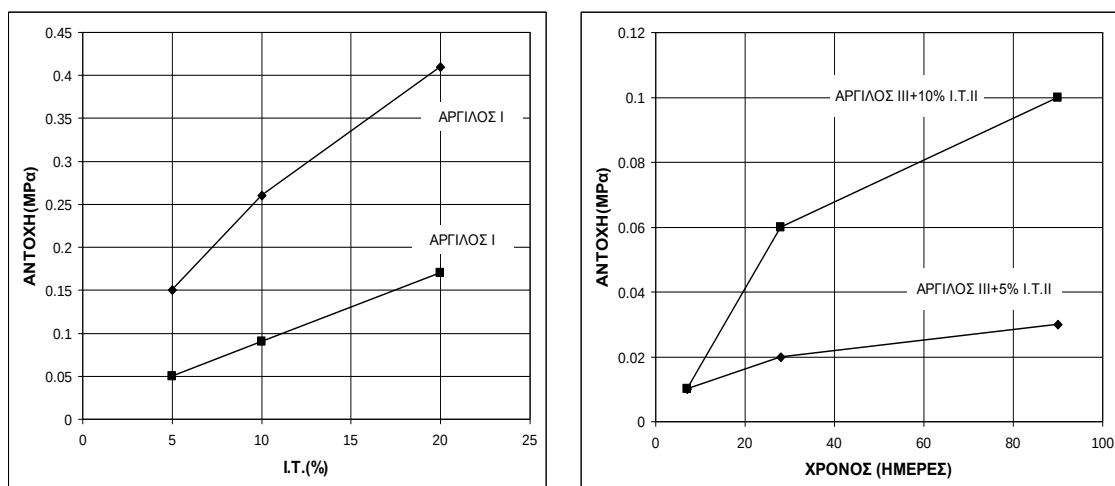
Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη και της τιμής CBR που βρέθηκε για τα εξετασθέντα εδαφικά υλικά Αργίλος Ι και Αργίλος ΙΙ.

Αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό

Η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (διάρρηξη) προσδιορίστηκε επίσης με κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 50mm και ύψους 100mm με τη διάταξη φόρτισης του Σχήματος 11 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 12.



Σχ. 11: Διάταξη φόρτισης σε διάρρηξη



Σχ. 12: Αντοχές σε εφελκυσμό (διάρρηξη) για τα εδαφικά υλικά Αργίλος I και Αργίλος III

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση ασβεστούχου I.T. ως σταθεροποιητή αργιλικών εδαφικών υλικών παρέχει την δυνατότητα βελτίωσης των ιδιοτήτων των υλικών αυτών ως προς:

1. Τα όρια Atterberg (ελαχιστοποίηση ή και μηδενισμός του δείκτη πλαστικότητας).
2. Την δυνατότητα επεξεργασίας τους (θρυμματισμός, συμπύκνωση υπό συνθήκες υψηλής υγρασίας, ανάμιξη με άλλα υλικά).
3. Την αύξηση της αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό.

4. Την αύξηση της τιμής C.B.R.

Από την εργασία αυτή γίνεται φανερό ότι η χρησιμοποίηση I.T. υψηλής περιεκτικότητας σε CaO παρέχει σημαντικές δυνατότητες σταθεροποίησης αργιλικών εδαφικών υλικών και χρησιμοποίηση τους, ανάλογα με το είδος του οδοστρώματος, ως βελτιωμένων στρώσεων έδρασης, υποβάσης ή και βάσης. Ιδιαίτερα επισημαίνεται η οικονομική ωφέλεια που μπορεί να έχει η χρησιμοποίηση σταθεροποιημένων με I.T. στρώσεων έδρασης οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. BS-1924.
2. Dallas N Little, Handbook for Stabilization of Pavement Sub grades and Base Courses with Lime Kendal Hund Publishing Company 1995.
3. Καραχάλιος Αναστάσιος, Σταθεροποίηση αργιλικών εδαφών με ιπτάμενη τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε Άσβεστο: Μηχανικές ιδιότητες, διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσεως σε στρώσεις έδρασης οδοστρωμάτων, Μεταπτυχιακή Εργασία - ΔΠΜΕ Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών.
4. Sherwood Philip,TRL,State of the Art Review, Soil Soil Stabilization with cement and lime, HMSO1993.

**ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΛΑΦΙΚΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΑΣΒΕΣΤΟΥΧΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ
ΜΕ Η ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟ**

**β) Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό,
σε κάμψη και μέτρο ελαστικότητας**

Σ. Κόλιας, Α. Καραχάλιος

*Εργαστήριο Οδοποιίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773
Ζωγράφου Αθήνα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σε αργιλικά εδαφικά υλικά σταθεροποιημένα με ασβεστόχχο ιπτάμενη τέφρα ή και με τσιμέντο διενεργούνται δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό, σε κάμψη και σε θλίψη με ταυτόχρονη μέτρηση των παραμορφώσεων για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας. Οι δοκιμές γίνονται σε δοκίμια ηλικίας 1, 7 και 28 ημερών. Επίσης διερευνάται η επίδραση του τρόπου φόρτισης στο μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη. Αποδεικνύεται ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σταθεροποιημένων υλικών βελτιώνονται σημαντικά και καθιστούν τη χρήση τους για στρώσεις έδρασης ή υποβάσεις οδοστρωμάτων τεχνικά πολύ αποτελεσματική και οικονομικά πολύ συμφέρουσα.

Λέξεις κλειδιά: ασβεστόχχος ιπτάμενη τέφρα (ακατέργαστη), σταθεροποίηση αργιλωδών εδαφών, τσιμέντο, αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό, αντοχή σε κάμψη, μέτρο ελαστικότητας σταθεροποιημένων εδαφών

STABILIZATION OF FINE CLAY SOILS WITH HIGH CALCIUM FLY ASH AND WITH OR WITHOUT CEMENT

b) Direct tensile strength, flexural strength and modulus of elasticity

S. Kolias, A. Karahalios

*Highway Engineering Laboratory, School of Civil Engineering, NTUA 5 Iroon Polytechniou str.
15773 Athens*

ABSTRACT: Fine grained clayey soils are stabilized with (untreated) high calcium fly ash and in certain cases with cement. The results are discussed in terms of direct tensile, flexural, and compressive strength as well as modulus of elasticity for 1, 7, and 28 day-old specimens. The influence of the loading type on modulus of elasticity is also investigated. The results show a considerable enhancement of the mechanical properties of the stabilized materials rendering them technically and economically very suitable for pavement sub base and subgrade improvement.

Keywords: high calcium fly ash, stabilization of fine-grained soils, compressive strength, direct tensile strength, flexural strength, modulus of elasticity

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία είναι συνέχεια της εργασίας [Κόλιας και Καραχάλιος 2005] σε αυτό το Συνέδριο και επομένως τα υλικά και οι μέθοδοι παρασκευής των δοκιμών δεν περιγράφονται στην παρούσα εργασία αλλά στην προηγούμενη. Συγκεκριμένα στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε κυρίως εδαφικό υλικό ονομαζόμενο «άργιλος ΙΙΙ» αν και ορισμένα αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας δίνονται για τα εδαφικά υλικά «άργιλος Ι» και «άργιλος ΙΙ». Λεπτομέρειες σχετικά με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και την προετοιμασία τους παρέχονται στην προηγούμενη εργασία.

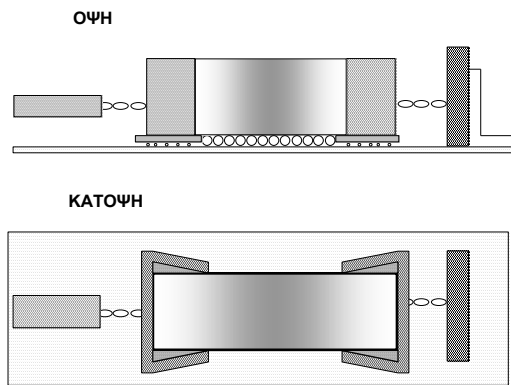
ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Παρασκευάστηκαν δοκίμια κυλινδρικά με διάμετρο 5cm και ύψος 10 cm (για τον προσδιορισμό αντοχής σε μονοαξονική και αντιδιαμετρική θλίψη) και διαμέτρου 7cm και ύψους 14cm (για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε θλίψη). Τα δοκίμια αυτά παρασκευάστηκαν με τη βέλτιστη υγρασία έτσι ώστε να έχουν προκαθορισμένη πυκνότητα ίση προς τη μέγιστη της αντίστοιχης δοκιμής συμπίκνωσης σύμφωνα με το πρότυπο BS 1924 § 5.12 με την διαφορά ότι χρησιμοποιήθηκαν απολύτως κυλινδρικά δοκίμια αντί των ελαφρώς κωνικών δοκιμών που προβλέπονται στο BS. Επίσης κατασκευάστηκαν δοκίμια πρισματικής μορφής διαστάσεων 10cm.x10cm.x50cm. για τον προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό. Τα πρισματικά δοκίμια παρασκευάστηκαν σε δύο περίπου ισόπαχες στρώσεις οι οποίες συμπυκνώθηκαν με την χρήση ηλεκτρόσφυρας (pr EN 13286-51). Μετά την αποπεράτωση της διαδικασίας συμπυκνώσεως της πρώτης στρώσεως επακολουθούσε αναμόχλευση με αιχμηρό όργανο της δημιουργηθείσας επιφάνειας, σε βάθος 0.5-1 cm. περίπου, έτσι ώστε να αναπτύσσεται η μέγιστη δυνατή πρόσφυση μεταξύ των δύο στρώσεων.

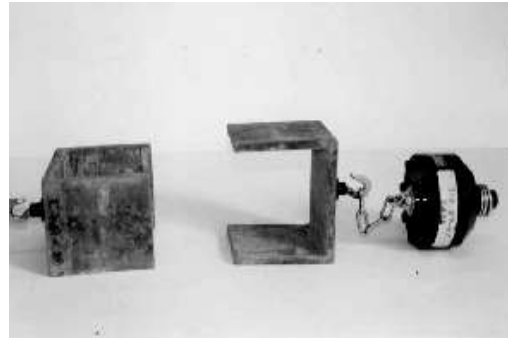
ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Για τον προσδιορισμό της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας σε εφελκυσμό παρασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 10 cm.x10 cm.x 50 cm. με ποσοστά τέφρας 5%, 10% και 20% άργιλο ΙΙΙ. Οι δοκιμές έγιναν σε 1, 7, και 28 ημέρες. Επειδή τα δοκίμια ήσαν βαριά (περίπου 9-11 kgf.) σε σχέση με την αντοχή τους, ήταν πρακτικά αδύνατον να χρησιμοποιηθεί η διάταξη που συνήθως χρησιμοποιείται, όπου το φορτίο ασκείται κατακόρυφα, και τελικά χρησιμοποιήθηκε η διάταξη του σχήματος 1. Η άσκηση του φορτίου στο δοκίμιο γινόταν μέσω δύο αρπαγών σχήματος λοξού Π (σχ.2). Ο εγκιβωτισμός του δοκιμίου μέσα στις δύο αρπάγες πραγματοποιήθηκε με την χρήση ταχύπηκτου κονιάματος. Το δοκίμιο εδράζονταν σε μια σειρά από χαλύβδινες σφαίρες.

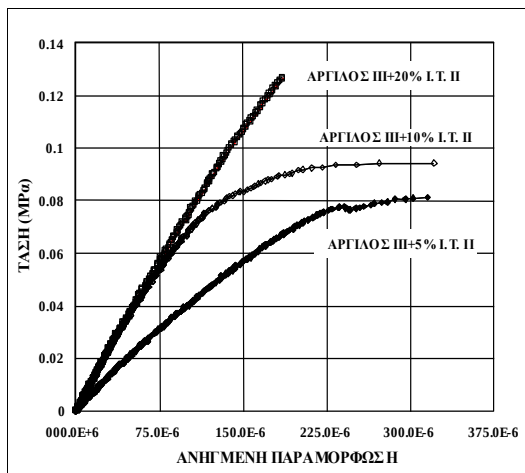
Μετά την θραύση των δοκιμών σε εφελκυσμό τα δύο τμήματα που δημιουργήθηκαν στην κάθε περίπτωση αποχωρίστηκαν από τις αρπάγες και μετά προσδιορίστηκε η αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 3, 4,5,6 και 7. Είναι φανερό ότι η αύξηση της αντοχής κυμαίνεται από 90% (για 5% και 10 % Ι.Τ.) έως 145% (για 20% Ι.Τ.) και του μέτρου ελαστικότητας (από 230% έως 350%). Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε εφελκυσμό και της αντοχής σε θλίψη ισοδυνάμου κύβου.



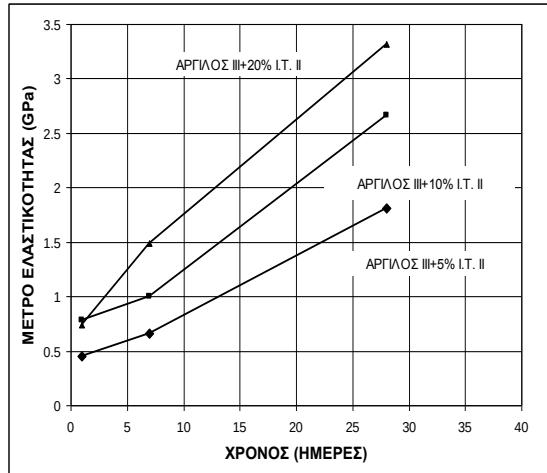
Σχ. 1: Διάταξη δοκιμής σε εφελκυσμό



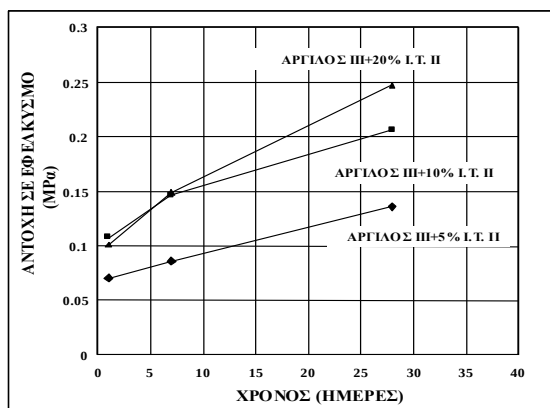
Σχ. 2: Αρπάγες επιβολής εφελκυστικού φορτίου



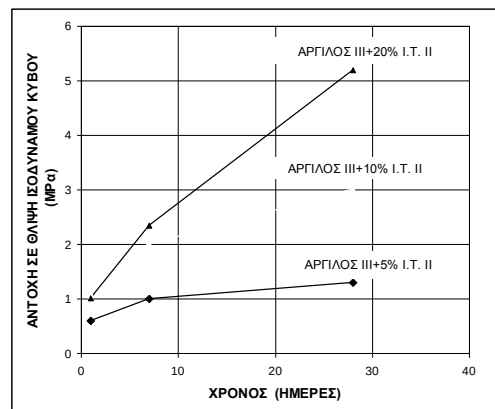
Σχ. 3: Τυπικά διαγράμματα σ-ε σε εφελκυσμό



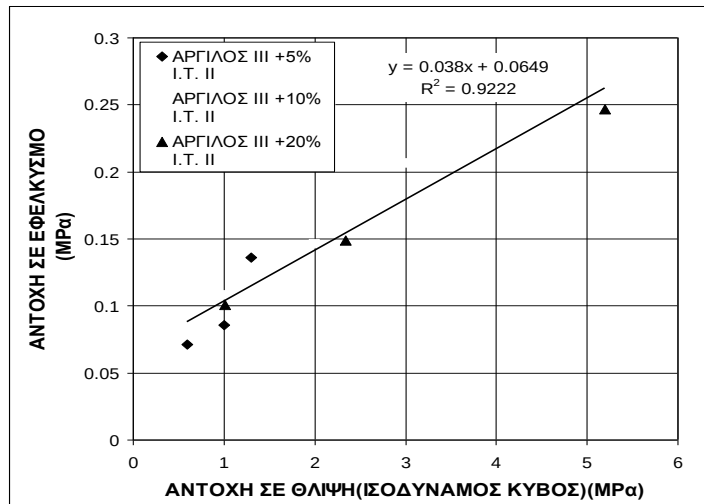
Σχ. 4: Μεταβολή του Ε σε σχέση με τον χρόνο



Σχ. 5: Μεταβολή της αντοχής σε εφελκυσμό



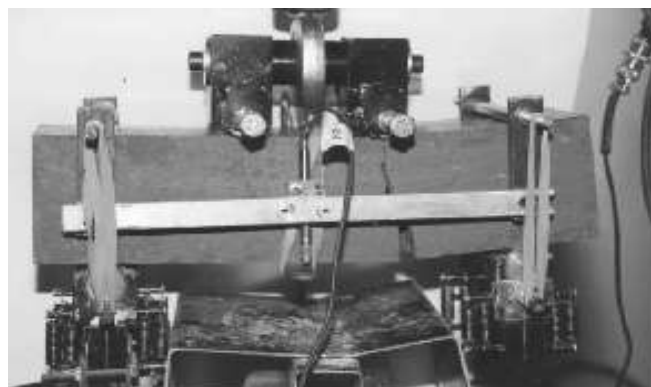
Σχ. 6: Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη



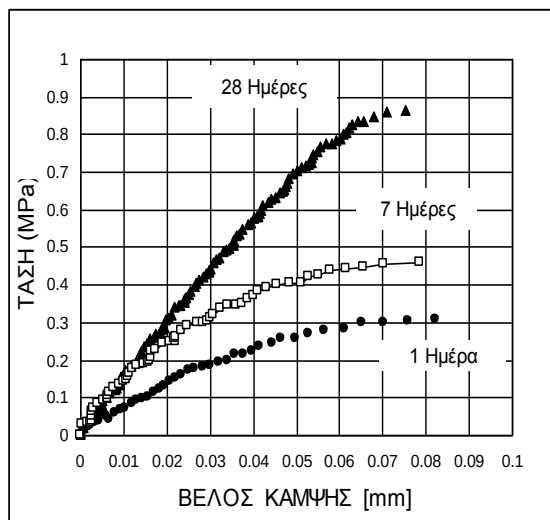
Σχ. 7: Συσχέτιση της αντοχής ισοδύναμου κύβου με την αντοχή σε καθαρό εφελκυσμό

ΚΑΜΨΗ

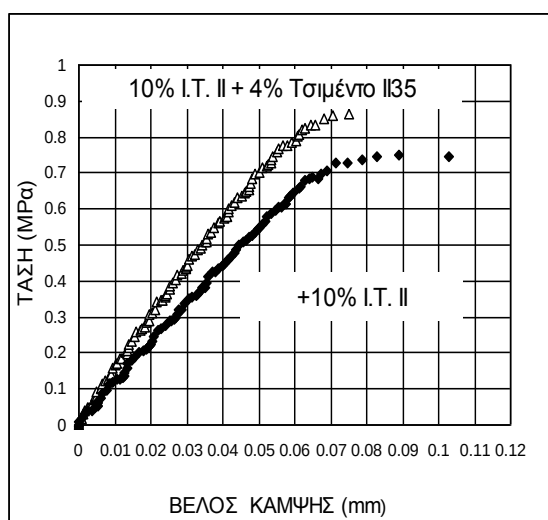
Οι σταθεροποιημένες στρώσεις ή στρώσεις έδρασης ενός οδοστρώματος επιπονούνται από τα φορτία των οχημάτων σε κάμψη και για το λόγο αυτό η καμπτική αντοχή των υλικών αυτών είναι σημαντική παράμετρος διαστασιολόγησης. Η αντοχή σε κάμψη προσδιορίστηκε για δύο περιπτώσεις σταθεροποιητών: α) 10% I.T II και β) 10% I.T I και 4% τσιμέντο Π35. Παρασκευάστηκαν δοκίμια σχήματος ορθογωνίου πρίσματος διαστάσεων 10 cm.x10 cm.x40 cm. με την ίδια ακριβώς τεχνική που κατασκευάστηκαν τα δοκίμια του οριζόντιου εφελκυσμού. Η δοκιμή σε κάμψη έγινε με επιβολή δύο φορτίων στα τρίτα του ανοίγματος και με ταυτόχρονη καταγραφή του βέλους στο μέσον του ανοίγματος με ειδική διάταξη (Σχ 8). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 9, 10 11 και 12. Η αντοχή σε κάμψη αυξάνεται σε σχέση με το χρόνο (από 100% (7 ημέρες) έως 180% (28 ημέρες) περίπου). Ο συνδυασμός τσιμέντου Π35 μαζί με ιπτάμενη τέφρα, δίνει στο εδαφικό δείγμα σημαντικά μεγάλη αντοχή σε κάμψη (0,65 MPa). Η αντίστοιχη αύξηση λόγω της προσθήκης τσιμέντου είναι περίπου 23% σε όλες τις ηλικίες. Επιπλέον το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη αυξάνεται με το χρόνο και με την προσθήκη τσιμέντου.



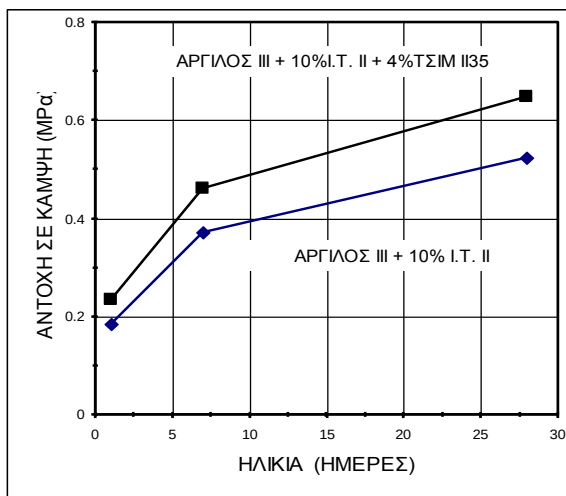
Σχ. 8: Διάταξη δοκιμής σε κάμψη



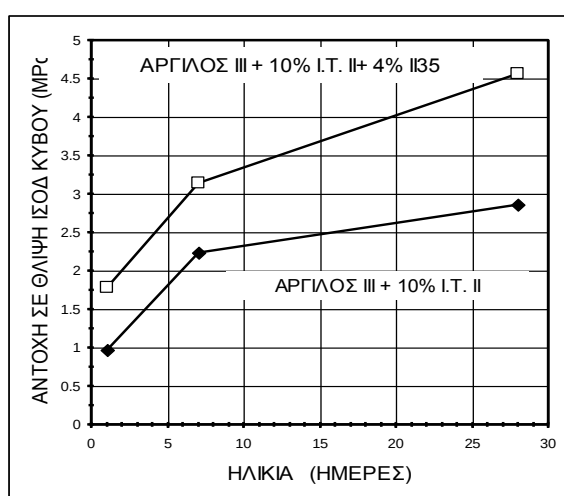
Σχ. 9: Τάση-βέλος κάμψης, Διάφορες ηλικίες



Σχ. 10: Τάση-βέλος κάμψης. Επίδραση σταθεροποιητή



Σχ. 11: Αντοχή σε κάμψη



Σχ. 12: Αντοχή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου

Πίνακας 1: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη

Εδαφικό Υλικό Άργιλος ΙΙΙ		1 ημέρα			7 ημέρες			28 ημέρες		
Σταθεροποιητής		f_b	E_b	f_{ec}	f_b	E_b	f_{ec}	f_b	E_b	f_{ec}
ΙΤ	Τσιμ ΙΙ 35	MPa	GPa	MPa	MPa	GPa	MPa	MPa	GPa	MPa
10 %	4 %	0.23	0.13	1.79	0.46	0.35	3.14	0.65	0.47	4.57
10%	0	0.18	0.14	0.97	0.37	0.20	2.23	0.52	0.28	2.85

f_b = αντοχή σε κάμψη , E_b = μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη , f_{ec} = αντοχή ισοδύναμου κύβου

ΘΛΙΨΗ

Για τη μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια κυλινδρικά διαστάσεων 7cm.x14cm. τα οποία παρασκευάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο BS1924. Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίστηκε με 4 μεθόδους επιβολής επιπόνησης οι οποίες περιελάμβαναν φορτίσεις μέχρι το 1/3 της αντοχής α) με δύο ταχύτητες επιβολής φορτίου – μικρή και μεγάλη β) με δυναμική φόρτιση ημιτονοειδούς μορφής και γ) με επιβολή σταθερής ταχύτητας παραμόρφωσης μέχρι θραύσεως του δοκιμίου. Η έρευνα αυτή έγινε σε μία προσπάθεια να διερευνηθεί η συμπεριφορά των υλικών στις διάφορες μορφές φορτίσεων στις οποίες υποβάλλονται οι σταθεροποιημένες στρώσεις στα οδοστρώματα. Κατά τις δοκιμές καταγράφοντο οι τάσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας προσδιορίστηκε από την παραμόρφωση που καταγράφετο στο 1/3 περίπου της αντοχής του υλικού. Ειδικότερα οι μέθοδοι επιπόνησης του δοκιμίου ήσαν οι ακόλουθες

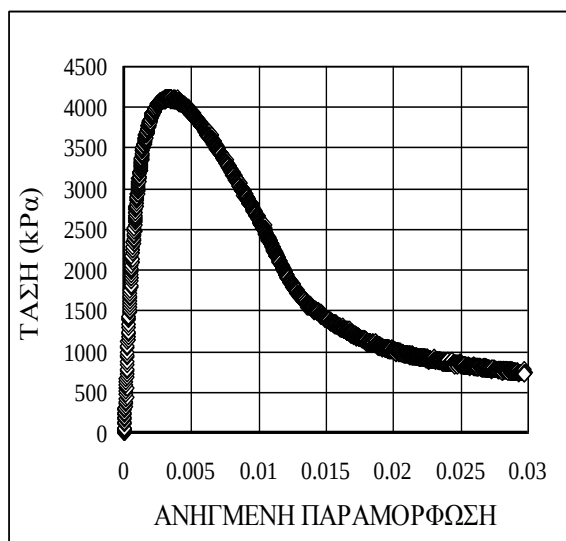
Μέθοδος T1 – Μεγάλη ταχύτητα επιβολής φορτίου. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται μέχρι το επιβαλλόμενο φορτίο να φτάσει την τιμή P/3 (P: φορτίο θραύσης σε μονοαξονική θλίψη) σε χρόνο 0,30sec. Ο χρόνος αυτός είναι περίπου ο χρόνος φόρτισης που επιβάλλει συνήθως η κυκλοφορία εμπορικών οχημάτων.

Μέθοδος T2 – Μικρή ταχύτητα επιβολής φορτίου. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται με ταχύτητα φόρτισης ίση με 0,2N/mm²/sec όπως προβλέπεται από τα αντίστοιχα πρότυπα προσδιορισμού μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος

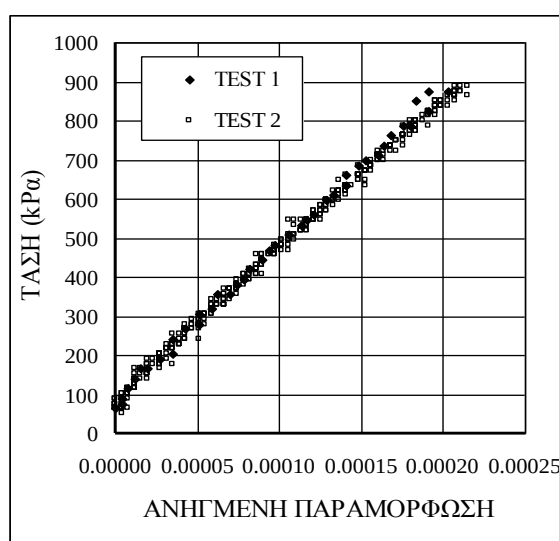
Μέθοδος T3 – Σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται έτσι ώστε η ταχύτητα παραμόρφωσης να είναι ίση περίπου με 1 mm./min.

Μέθοδος T4- Δυναμική φόρτιση. Η επιβολή του φορτίου πραγματοποιείται με συνεχείς κύκλους ημιτονοειδών φορτίσεων έτσι ώστε η περίοδος της φόρτισης να είναι 0,60sec και το εύρος της ίσο με P/3.

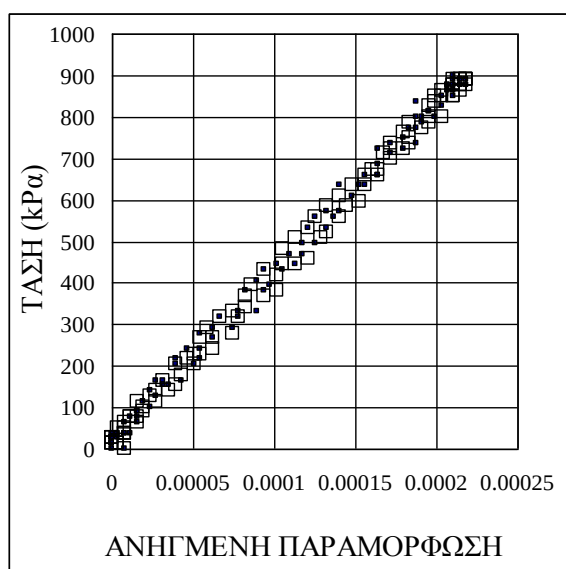
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 13, 14, 15 και 16. Είναι φανερό ότι τα εξετασθέντα είδη φόρτισης δεν επηρεάζουν σημαντικά την τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της αντοχής σε θλίψη και σε εφελκυσμό επιτυγχάνεται και σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Η αύξηση αυτή είναι συνάρτηση της ηλικίας του ποσοστού της Ι.Τ. και του τσιμέντου. Τα βελτιωμένα αυτά μηχανικά χαρακτηριστικά των σταθεροποιημένων αργιλικών εδαφικών υλικών τα καθιστά κατάλληλα για χρήση στη κατασκευή οδοστρωμάτων για αναβάθμιση της φέρουσας ικανότητας της στρώσης έδρασης (αυτοκινητόδρομοι, οδοί βαριάς κυκλοφορίας) ή και για υπόβαση σε οδούς ελαφριάς κυκλοφορίας.



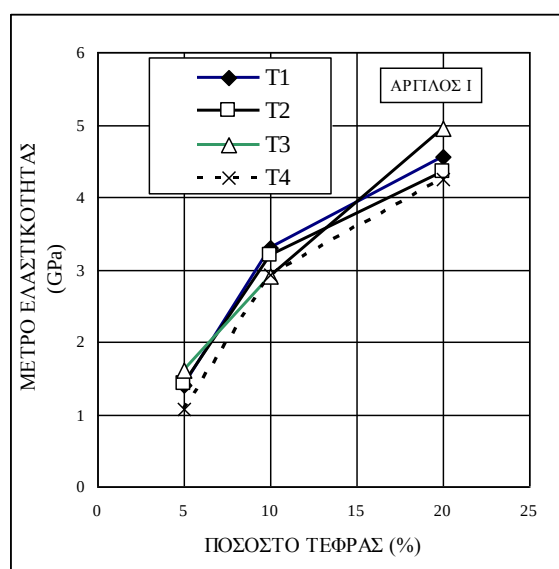
Σχ. 13: Διάγραμμα σ-ε σε θλίψη



Σχ. 14: Διάγραμμα σ-ε για μεγάλη και μικρή ταχύτητα φόρτισης



Σχ. 15: Τυπικό διάγραμμα σ-ε για τον 1^ο και στο για τον πρώτο και τελευταίο κύκλο φόρτισης



Σχ. 16: Επίδραση του είδους της φόρτισης μέτρο ελαστικότητας

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εργασία αυτή συμπεραίνεται ότι η χρησιμοποίηση της Ι.Τ. (με ή και χωρίς τσιμέντο) για την σταθεροποίηση αργιλικών εδαφικών υλικών παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον από άποψη τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά (αντοχή και μέτρο ελαστικότητας) βελτιώνονται σε τέτοιο βαθμό που καθιστούν τις σταθεροποιημένες στρώσεις για περιπτώσεις οδοστρωμάτων με βαριά

κυκλοφορία κατάλληλες για στρώση έδρασης με υψηλή φέρουσα ικανότητα γεγονός που μειώνει σημαντικά το απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Κόλιας, Σ. & Καραχάλιος, Α. 2005 Σταθεροποίηση αργιλικών εδαφικών υλικών με ασβεστόχο Ιπτάμενη Τέφρα με ή χωρίς τσιμέντο. α) Αντοχή σε θλίψη, διάρρηξη και CBR. 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΒΙΠΑΡ.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΛΑΦΙΚΗ ΣΤΡΩΣΗ ΜΕ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΚΑΙ Η ΧΩΡΙΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Σ. Κόλιας, Α.Καραχάλιος

Εργαστήριο Οδοποιίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Παρουσιάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός του πάχους ενός οδοστρώματος με στρώση έδρασης από σταθεροποιημένο αργιλώδες εδαφικό υλικό με ασβεστούχο ιπτάμενη τέφρα και ή χωρίς τσιμέντο. Το οδόστρωμα αυτό συγκρίνεται με σύνηθες εύκαμπτο οδόστρωμα με στρώση έδρασης που προκύπτει μετά από εξυγίανση του επιτόπου εδάφους. Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σταθεροποιημένων εδαφών με ιπτάμενη τέφρα που προσδιορίστηκαν στο εργαστήριο. Συμπεραίνεται ότι η επιτόπου σταθεροποίηση εδαφικών υλικών με μικρή φέρουσα ικανότητα προσφέρει τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά αξιόλογες λύσεις που πρέπει να εξετάζονται υποχρεωτικά στις περιπτώσεις εδαφών με μικρή φέρουσα ικανότητα πριν αποφασιστεί η κατασκευή του οδοστρώματος.

Λέξεις κλειδιά: ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα (ακατέργαστη), σταθεροποίηση αργιλωδών εδαφών, τσιμέντο, αντοχή σε θλίψη, εφελκυσμό σταθεροποιημένων αργιλωδών εδαφών, CBR σταθεροποιημένων εδαφών

ANALYTICAL DESIGN OF PAVEMENTS INCORPORATING A CAPPING LAYER OF STABILIZED SOIL WITH HIGH CALCIUM FLY ASH AND OR CEMENT

S. Kolias, A. Karahalios

Highway Engineering Laboratory of NTUA, 5, Irroon Polytechniou 15773 Athens

ABSTRACT: The analytical design of a pavement incorporating a capping layer of stabilized fine grained clayey soil with high calcium fly ash is presented and compared with a conventional flexible pavement with a capping layer with improved imported granular material. For the analysis the mechanical properties of soils stabilized with fly ash and or cement measured in the laboratory are used. It is concluded that the in-situ stabilization of low bearing capacity soils, offers solutions with technical, economic and environmental advantages in comparison to the conventional flexible pavements. It is suggested that the investigation of the possibility of in-situ stabilization should always be examined in case of low bearing capacity soils.

Keywords: high calcium fly ash, stabilization of fine-grained soils, cement compressive, tensile strength of stabilized soils, CBR of stabilized soils

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

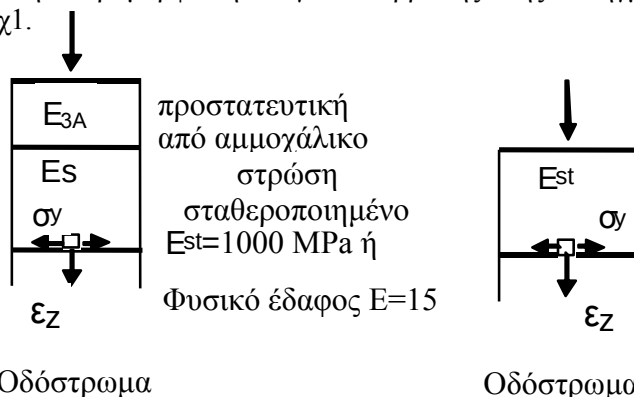
Για την πλήρη ανάλυση της συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος με τη χρήση σταθεροποιημένης στρώσης στη βάση ή στην υπόβαση ή στην ενισχυμένη στρώση έδρασης απαιτείται η ανάλυση αυτή να γίνει σε δύο χρονικές στιγμές: φάση κατασκευής και φάση λειτουργίας. Αρχικά, στη φάση κατασκευής η μόλις αποπερατωμένη σταθεροποιημένη στρώση θα καταπονείται από την επιβολή φορτίων της κατασκευαστικής κυκλοφορίας και την επιβολή παραμορφώσεων (ξήρανση και θερμοκρασιακές μεταβολές). Στη συνέχεια στη φάση λειτουργίας θα καταπονείται κυρίως από τα φορτία λειτουργίας (κυκλοφορία λειτουργίας). Οι επιπρόσθετες λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών είναι συνήθως ηπιότερες διότι έχει επέλθει εντωμεταξύ θερμοκρασιακή ρηγμάτωση. Ως τυπικό φορτίο θεωρήθηκε άξονας 11.5 tn με δίδυμους τροχούς, το οποίο αναμένεται ότι θα καθιερωθεί ως το τυπικό φορτίο μελέτης και ανάλυσης οδοστρώματων στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Για να αντιμετωπισθούν τα φαινόμενα της ξήρανσης και των θερμοκρασιακών διαφορών μέσα στη στρώση φαινόμενα τα οποία έχουν ως συνέπεια την ανάπτυξη έντονων παραμορφώσεων οι οποίες παρεμποδίζονται προτείνεται η κατασκευή μιας προστατευτικής στρώσης από θραυστό αμμοχάλικο (ΠΤΠ Ο155 ή Ο150) ελάχιστου πάχους από 150mm. έως 200mm. Η στρώση αυτή δρα σαν μονωτική στρώση παρεμποδίζοντας τις έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές και την εξάτμιση της υγρασίας από τη σταθεροποιημένη στρώση ενώ ταυτόχρονα την προστατεύει από τα φορτία των οχημάτων.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

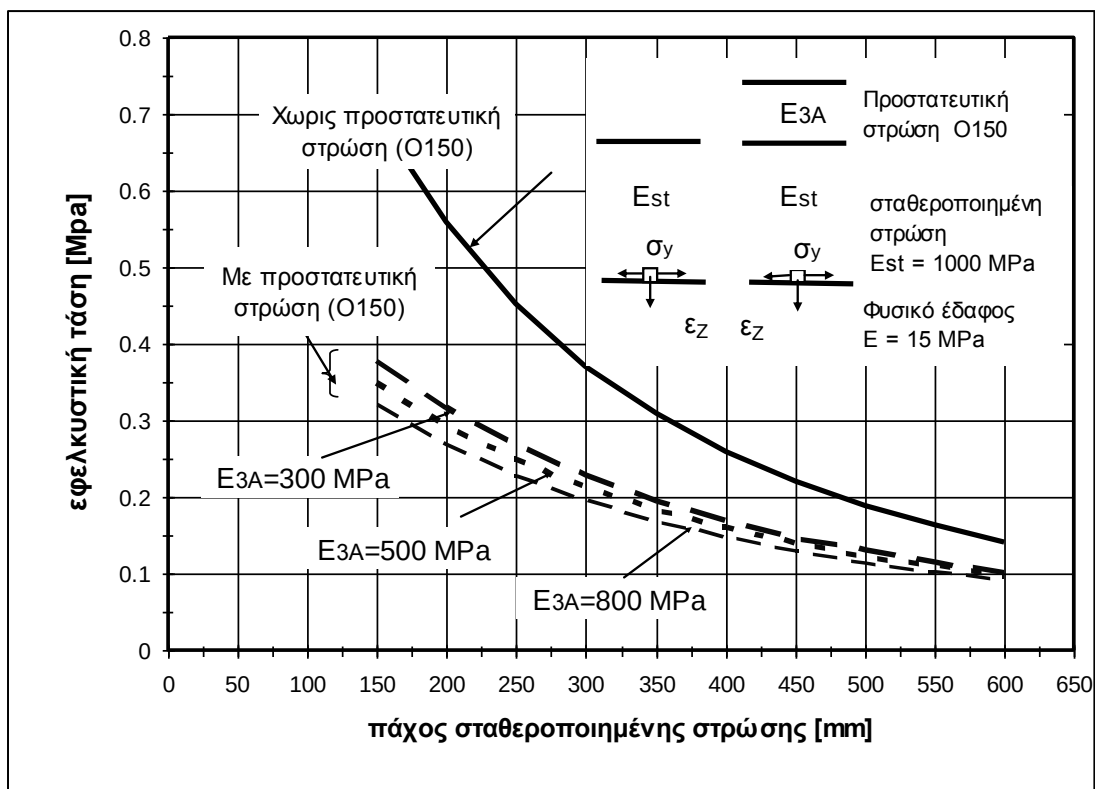
Φάση κατασκευής

Στη φάση της κατασκευής εξετάζονται δύο τύποι οδοστρώματων όπως φαίνεται στο Σχ1. Το οδόστρωμα Α αποτελείται από την στρώση από σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό που εδράζεται στο φυσικό έδαφος και επιπλέον έχει μία προστατευτική στρώση από αμμοχάλικο ΠΤΠ Ο150 ή Ο155 πάχους 200mm. Το οδόστρωμα Β είναι όπως το Α χωρίς όμως την προστατευτική στρώση. Τα οδοστρώματα εξετάζονται έναντι αστοχίας της σταθεροποιημένης στρώσης από υπέρβαση της επιτρεπόμενης οριζόντιας εφελκυστικής τάσης σ_y και έναντι αστοχίας της στρώσης του φυσικού εδάφους από υπερβολική παραμόρφωση λόγω υπέρβασης της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης ϵ_z , βλ Σχ1.



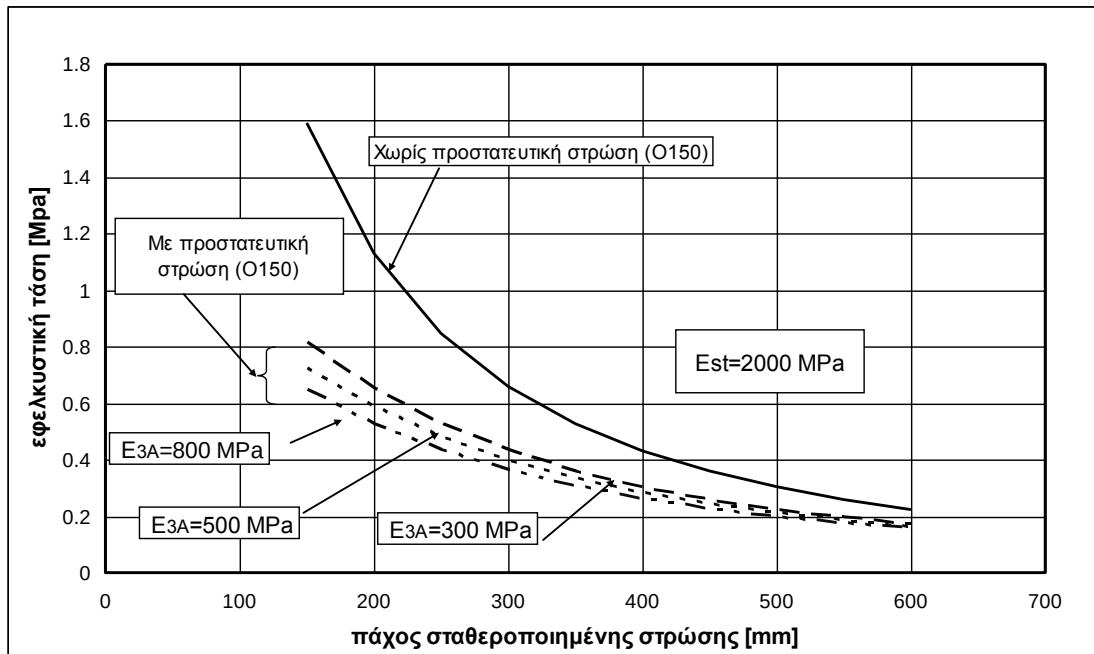
Σχ. 1: Τύποι οδοστρώματων που αναλύονται για την φάση της κατασκευής

Στα σχήματα 2 και 3 φαίνεται η μεταβολή της τάσεως σ_y στη σταθεροποιημένη στρώση συναρτήσει του πάχους αυτής και του μέτρου ελαστικότητας (E_{3A}) του υλικού της προστατευτικής στρώσης. Επίσης παρουσιάζεται η ίδια μεταβολή για την περίπτωση μη ύπαρξης προστατευτικής στρώσης. Το μέτρο ελαστικότητας της σταθεροποιημένης στρώσης E_{ST} , λήφθηκε ίσο με 1000 MPa για το οδόστρωμα του σχήματος 2 και 2000MPa για το οδόστρωμα του σχήματος 3. Η τάση σ_y καθορίζει τον κίνδυνο ρηγμάτων της σταθεροποιημένης στρώσης από την κυκλοφορία οχημάτων κατασκευής.

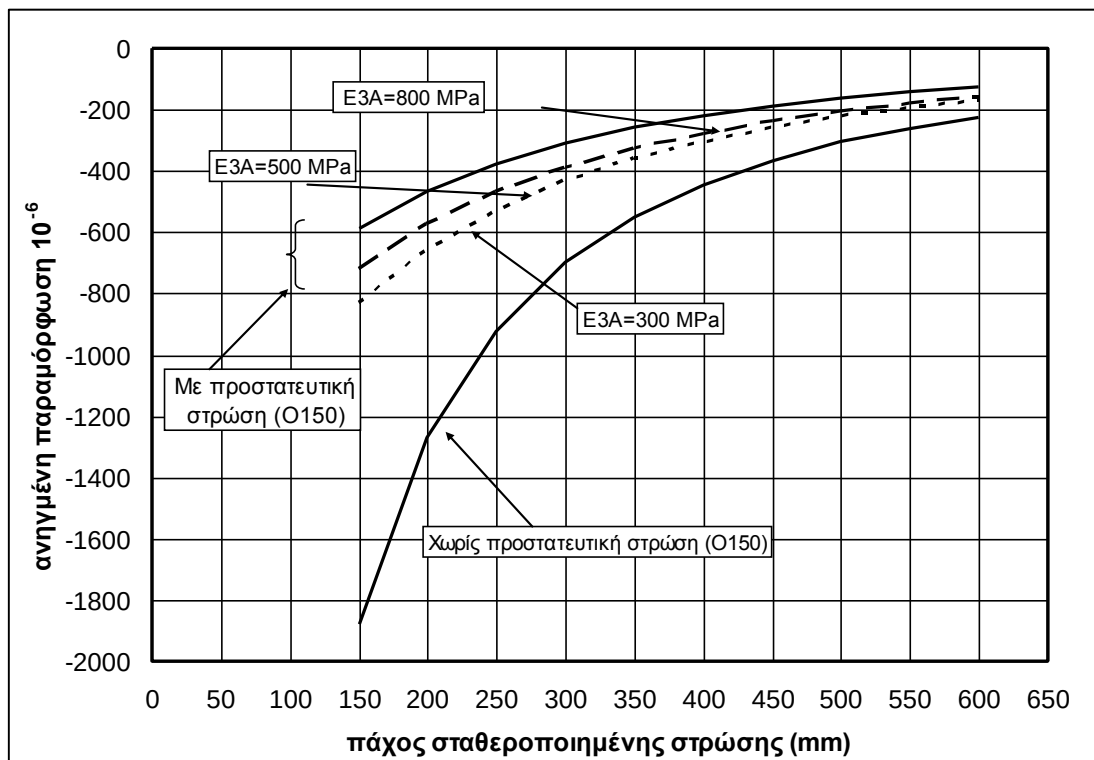


Σχ. 2: Μεταβολή της οριζόντιας εφελκυστικής τάσης σ_y στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης με το πάχος της στρώσης για $E_{st} = 1000$ MPa

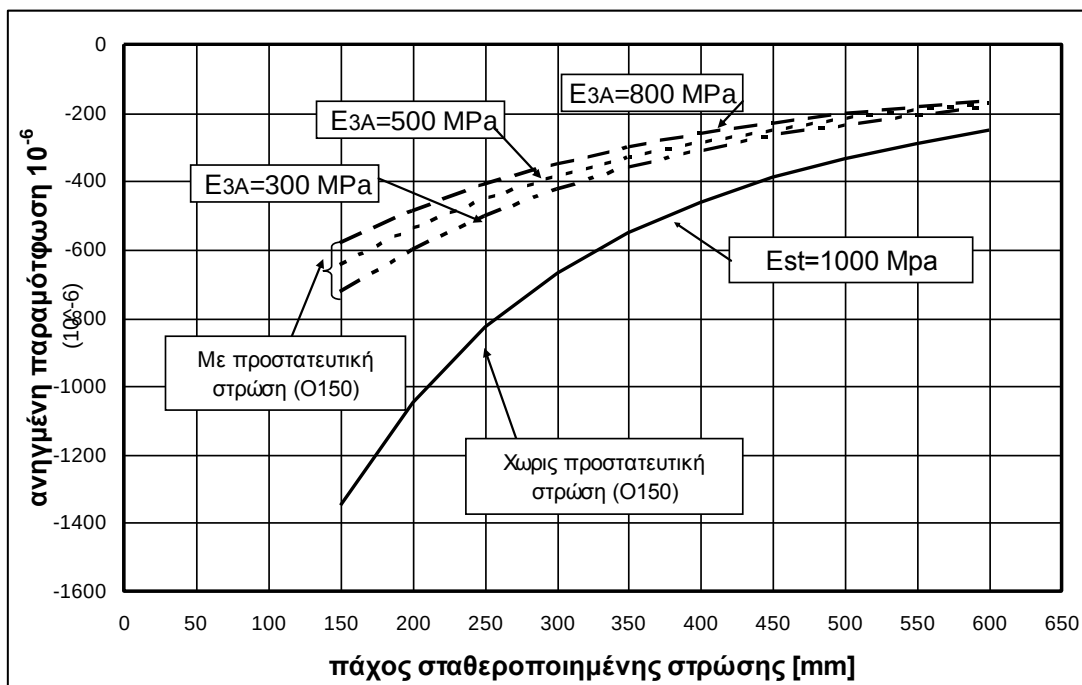
Αν θεωρηθεί επιτρεπόμενη τάση σε κάμψη του σταθεροποιημένου υλικού 0.13 MPa με μέτρο ελαστικότητας $E_{st}=1000$ MPa για την φάση κατασκευής προκύπτει ότι το απαιτούμενο πάχος της σταθεροποιημένης στρώσης είναι περίπου 450mm (σχήμα 2). Ανάλογο πάχος προκύπτει από το σχήμα 3 για την περίπτωση $E_{st}=2000$ MPa και αντοχή σε κάμψη 0,25MPa. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πρόσθετες ευεργετικές επιδράσεις της προστατευτικής στρώσης η οποία δρα μονωτικά σε θερμοκρασιακές μεταβολές και σε ξήρανση. Επιπλέον η στρώση αυτή εμποδίζει πλήρως την ανάπτυξη των ρωγμών που ενδεχομένως θα αναπτυχθούν στη σταθεροποιημένη στρώση προς την επιφάνεια του οδοστρώματος.



Σχ. 3: Μεταβολή της οριζόντιας εφελκυστικής τάσης σ_y στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης με το πάχος της στρώσης για $E_{st} = 2000$ MPa



Σχ. 4: Μεταβολή της κατακόρυφης ανηγμένης παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους ως συνάρτηση του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης για $E_{st} = 1000$ MPa



Σχ. 5: Μεταβολή της κατακόρυφης ανηγμένης παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους ως συνάρτηση του πάχους της σταθεροποιημένης στρώσης για $E_{st} = 2000$ MPa

Στα σχήματα 4 και 5 φαίνεται η μεταβολή της παραμόρφωσης ϵ_z στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους η οποία καθορίζει τον κίνδυνο αστοχίας του φυσικού εδάφους από τα φορτία των οχημάτων κατασκευής για τιμές του μέτρου ελαστικότητας $E_{st} 1000$ MPa και 2000 MPa αντίστοιχα. Είναι φανερή η σημαντική βελτίωση που επιφέρει η προστατευτική στρώση.

Φάση λειτουργίας

Για τη φάση αυτή αναλύονται δύο τύποι οδοστρωμάτων (βλ Σχ. 6) που κατασκευάζονται σε έδαφος με μικρή φέρουσα ικανότητα $CBR=2$. Το οδόστρωμα Α είναι ένα οδόστρωμα το οποίο – λόγω ασθενούς εδάφους – έχει μία στρώση πάχους 450 mm από το επιτόπου έδαφος σταθεροποιημένο με ιπτάμενη τέφρα. Το πάχος των 450 mm έχει εξαχθεί από την προηγούμενη ανάλυση έτσι ώστε η στρώση αυτή να μην αστοχήσει από την κυκλοφορία κατασκευής. Πάνω στη στρώση αυτή προβλέπεται στρώση από ασύνδετο αμμοχάλικο ΠΤΠ Ο155 πάχους 300 mm και τελικά επ' αυτής στρώσεις ασφαλτομιγμάτων με συνολικό πάχος που καθορίζεται από την μελέτη του οδοστρώματος. Το οδόστρωμα Β είναι ένα σύνηθες εύκαμπτο οδόστρωμα για περίπτωση εδάφους με μικρή φέρουσα ικανότητα με $CBR=2\%$. Με εξυγιαντική στρώση από κοκκώδη εδαφικά υλικά πάχους 400 mm και υπόβαση και βάση από ασύνδετα αμμοχάλικα ΠΤΠ Ο150 και Ο155. Το συνολικό πάχος των ασφαλτικών στρώσεων καθορίζεται από την μελέτη του οδοστρώματος και συγκρίνεται με το αντίστοιχα πάχος του οδοστρώματος Α.

Ο νόμος αστοχίας που υιοθετήθηκε για τον έλεγχο της ασφαλικής στρώσης από αστοχία από κόπωση είναι (σχέση 1):

$$\varepsilon_{\varepsilon\pi} = 1.11 \times 90 \cdot 10^{-6} \times (N/10^6)^{-0.207} \quad (1)$$

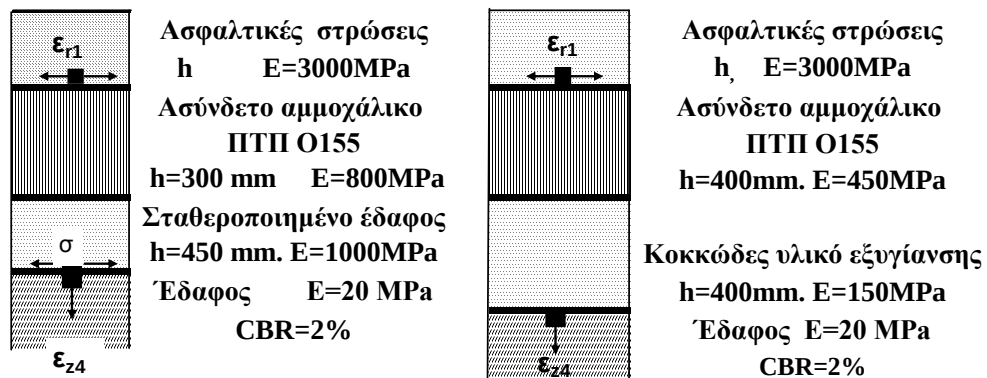
όπου $\varepsilon_{\varepsilon\pi}$ είναι η ανηγμένη οριζόντια παραμόρφωση ε_{r1} στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης για την οποία επιτρέπονται N επαναλήψεις φορτίσεων.

Ο νόμος αστοχίας που χρησιμοποιήθηκε, για τον έλεγχο της στρώσης έδρασης (φυσικό έδαφος), είναι το κριτήριο που προτείνει το TRRL (σχέση 2) και εξασφαλίζει την στρώση έδρασης και επομένως το οδόστρωμα από υπερβολική παραμόρφωση.

$$\varepsilon_{\varepsilon\pi} = 1,46 \times 10^{-2} \times N^{-0,253} \quad (2)$$

όπου $\varepsilon_{\varepsilon\pi}$ είναι η αναπτυσσόμενη παραμόρφωση ε_{z4} στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης για την οποία επιτρέπονται N επαναλήψεις φορτίσεων.

Στα σχήματα 7 και 8 παρουσιάζεται για τους δύο τύπους οδοστρωμάτων αντίστοιχα η μεταβολή του κρίσιμων μεγεθών των ανηγμένων παραμορφώσεων ε_{r1} και ε_{z4} που υπολογίστηκαν με πρόγραμμα H/Y με βάση ελαστικές επάλληλες στρώσεις. Για τη φόρτιση του οδοστρώματος θεωρήθηκε το δυσμενές φορτίο του απλού άξονα με τους νέους τύπους απλών τροχών (supper single) φορτίου 70000 N και ακτίνας 0.1575 m. Η θεώρηση αυτή έγινε για να ληφθεί κατά κάποιο τρόπο υπόψη το γεγονός ότι στη χώρα μας τα υπέρβαρα αυτοκίνητα αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό της κυκλοφορίας.



Σχ. 6: Συγκρινόμενοι δύο τύποι οδοστρωμάτων. Το συνολικό πάχος των ασφαλικών στρώσεων μεταβάλλεται.

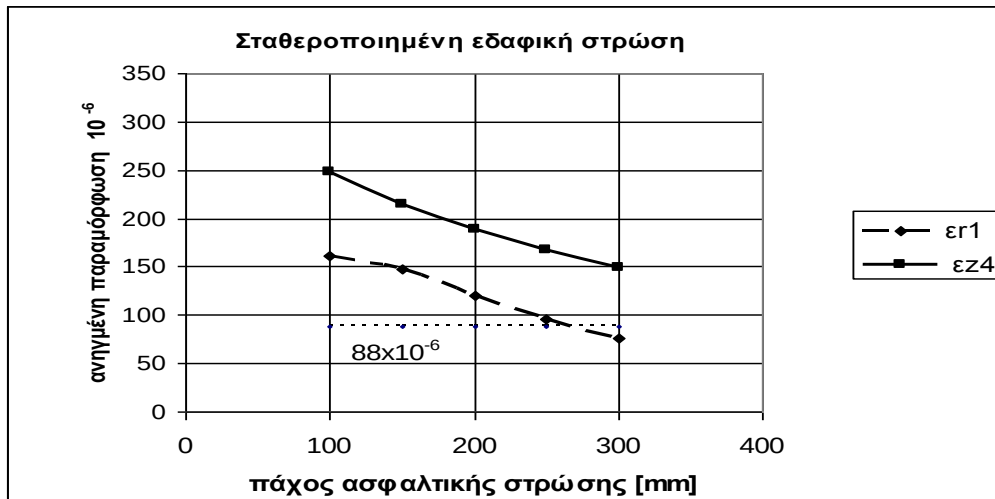
Η σύγκριση των δύο οδοστρωμάτων γίνεται για συνολικό αριθμό ισοδύναμων διελεύσεων για το ως άνω φορτίο άξονα με τους νέους τύπους απλών τροχών (supper single) ίσο με $N=10^6$.

Για $N=10^6$ οι επιτρεπόμενες τιμές ε_{r1} και ε_{z4} από τις σχέσεις (1) και (2) είναι :

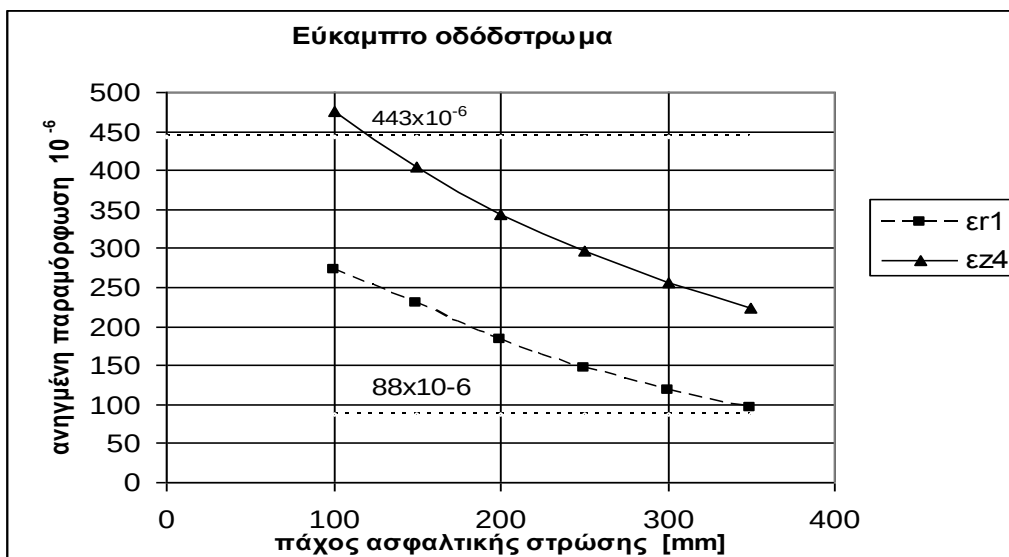
Επιτρεπόμενη ανηγμένη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στον πυθμένα της ασφαλικής $\varepsilon_{\varepsilon\pi r1} = 88 \times 10^{-6}$

Επιτρεπόμενη ανηγμένη κατακόρυφη θλιπτική
 παραμόρφωση στην επιφάνεια του εδάφους

$$\varepsilon_{\pi z4} = 443 \times 10^{-6}$$



Σχ. 7 : Μεταβολή των ανηγμένων παραμορφώσεων ε_{r1} και ε_{z4} με το πάχος της ασφαλτικής στρώσης για το οδόστρωμα Α



Σχ. 8: Μεταβολή των ανηγμένων παραμορφώσεων ε_{r1} και ε_{z4} με το πάχος της ασφαλτικής στρώσης για το οδόστρωμα Β.

Με βάση τις τιμές αυτές προσδιορίζεται από τα σχήματα 7 και 8 το απαιτούμενο συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων για το οδόστρωμα Α, 270 mm και για το οδόστρωμα Β 365 mm. Τα πάχη αυτά εξασφαλίζουν τα δύο οδοστρώματα από αστοχία της ασφαλτικής στρώσης από κόπωση. Το σχετικά μεγάλο μέγεθος της επιτρεπόμενης ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης στην επιφάνεια του εδάφους, $\varepsilon_{\pi z4} = 443 \times 10^{-6}$, υποδεικνύει ότι δεν υφίσταται κίνδυνος αστοχίας των

οδοστρώματων από υπερβολική παραμόρφωση του εδάφους, εκτός της περίπτωσης του οδοστρώματος Β για συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων μικρότερο από 120 mm. Σημειώνεται επίσης ότι όπως επιβεβαιώνεται και από το Σχ. 9 η σταθεροποιημένη στρώση δεν διατρέχει κανένα κίνδυνο ρηγμάτωσης από κόπωση λόγω κυκλοφορίας διότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι πολύ μικρότερες από την αντοχή σε κάμψη του υλικού (Κόλιας 2005).

Η παραπάνω ανάλυση για οδοστρώματα σε περιπτώσεις εδάφους με μικρή φέρουσα ικανότητα καταδεικνύει την δυνατότητα χρησιμοποίησης της μεθόδου σταθεροποίησης για την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του επιτόπου εδαφικού υλικού αντί της κλασσικής μεθόδου εξυγίανσης (απομάκρυνσης εδαφικής στρώσης σημαντικού πάχους και αντικατάστασή της από άλλη με κατάλληλο κοκκώδες).



Σχ. 9: Αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα της σταθεροποιημένης στρώσης για διάφορα συνολικά πάχη ασφαλτικών στρώσεων.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι το οδόστρωμα με σταθεροποιημένη στρώση (Α) έχει συνολικό πάχος ασφαλτικών στρώσεων κατά 95mm -100mm μικρότερο από το κλασσικού τύπου εύκαμπτο οδόστρωμα (Β). Ομοίως το πάχος βάσεως από υλικό ΠΤΠ Ο155 του οδοστρώματος (Α) είναι κατά 100mm μικρότερο από εκείνο του (Β). Πέραν αυτών των διαφορών η απομάκρυνση του ακατάλληλου υλικού, η εναπόθεση αυτού σε κατάλληλες θέσεις και η μεταφορά-διάστρωση και συμπίκνωση νέου κοκκώδους υλικού συνιστούν εργασίες οι οποίες επιφέρουν μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση αλλά και πιθανόν μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με την επιτόπου σταθεροποίηση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι φανερό ότι η μέθοδος της επιτόπου σταθεροποίησης των εδαφών με ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα ή και τσιμέντο προσφέρει τεχνικά αξιόλογες και οικονομικά συμφέρουσες λύσεις σε περιπτώσεις εδαφών με μικρή φέρουσα ικανότητα. Πιστεύεται ότι η δυνατότητα αυτή πρέπει να εξετάζεται υποχρεωτικά σε όλες τις περιπτώσεις εδαφών με μικρή φέρουσα ικανότητα ($CBR < 5\%$) και η τελική απόφαση να εξάγεται μετά από οικονομική σύγκριση των δύο λύσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Powell, Potter, Mayhew, Nunn (1984) The structural design of bituminous roads, - TRRL Laboratory Report 1132, Transport and Road Research Laboratory, 1984.
2. Σ. Κόλιας,, Α. Καραχάλιος (2005) Σταθεροποίηση αργιλικών εδαφικών υλικών με ασβεστούχο ιπτάμενη τέφρα με ή και χωρίς τσιμέντο β) Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό, σε κάμψη και μέτρο ελαστικότητας . 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ε.ΒΙ.ΠΑΡ. Θεσσαλονίκη 24-26 Νοεμβρίου, 2005.

ΒΕΛΤΙΩΣΗ – ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΛΑΦΩΝ ΜΕ ΕΝΕΣΕΙΣ ΑΙΩΡΗΜΑΤΩΝ ΛΕΙΟΤΡΙΒΗΜΕΝΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Ι. Ν. Μάρκου

*Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο
Πανεπιστήμιο Θράκης, Βασ. Σοφίας 12, 67100 Ξάνθη*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η βελτίωση που επιφέρουν τα αιωρήματα λειοτριβημένης ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας στα χαρακτηριστικά εμποτισμένων άμμων διερευνήθηκε πειραματικά. Χρησιμοποιήθηκαν καθαρές άμμοι με διαφορετικές κοκκομετρικές συνθέσεις και εμποτίστηκαν δοκίμια διαμέτρου 5 cm και ύψους 11,2 cm. Στα εμποτισμένα δοκίμια έγιναν δοκιμές διαπερατότητας και τριαξονικής φόρτισης. Διαπιστώθηκε ότι η μείωση της διαπερατότητας του εδάφους λόγω εμποτισμού κυμαίνεται από 4 ως 7 τάξεις μεγέθους. Ο εμποτισμός αυξάνει την ακαμψία και μειώνει την παραμορφωσιμότητα της άμμου. Οι τιμές της συνοχής των εμποτισμένων άμμων κυμαίνονται από 280 kPa ως 450 kPa μετά από ωρίμανση 28 ημερών και αυξάνονται κατά 30%, κατά μέσο όρο, για περίοδο ωρίμανσης που φθάνει τους 70 μήνες.

Λέξεις κλειδιά: ενέσεις εμποτισμού, ιπτάμενη τέφρα, εμποτισμένη άμμος, εργαστηριακός προσδιορισμός, διαπερατότητα, διατμητική αντοχή, τριαξονική φόρτιση

SOIL IMPROVEMENT – REINFORCEMENT BY PULVERIZED FLY ASH SUSPENSION GROUTING

I. N. Markou

*Soil Mechanics & Foundation Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
Democritus University of Thrace, 12 Vas. Sofias Str., GR-67100 Xanthi*

ABSTRACT: A laboratory investigation was conducted in order to evaluate the improvement of shear strength and permeability of sands grouted with pulverized Ptolemaida fly ash suspensions. Suspensions were injected into clean sands with different gradations and the grouted specimens (diameter 5 cm and height 11.2 cm) were tested in triaxial compression. Permeability tests were also carried out. The coefficient of permeability of the sands is improved by 4 to 7 orders of magnitude. Grouting increases the stiffness and reduces the deformability of the sands. The cohesion values of grouted sands range from 280 kPa to 450 kPa after 28 days of curing and increase by 30%, on the average, when the curing period is extended to 70 months.

Keywords: injection grouting, fly ash, grouted sand, laboratory investigation, permeability, shear strength, triaxial compression

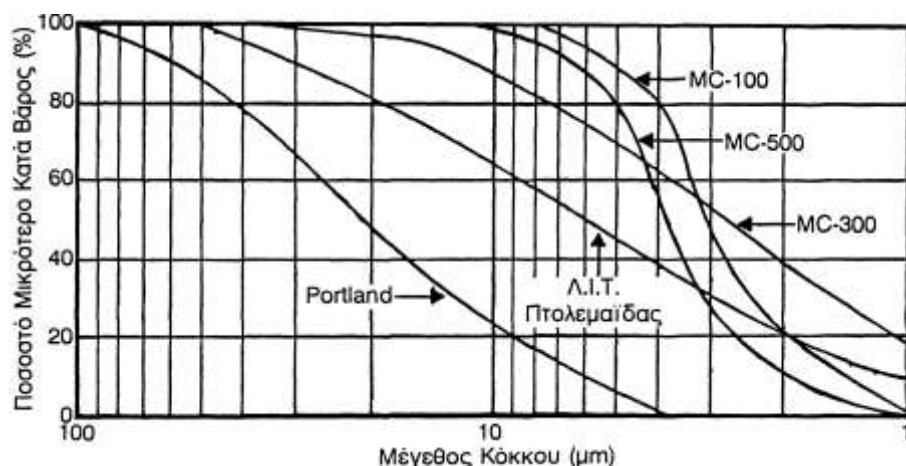
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιπτάμενη τέφρα είναι παραπροϊόν της καύσης του άνθρακα στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Η ποσότητα ιπτάμενης τέφρας που παράγεται ετησίως είναι πολύ μεγάλη αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτής της ποσότητας αξιοποιείται, κυρίως από τις βιομηχανίες παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος. Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται και σε ενέσεις εμποτισμού για τη βελτίωση – ενίσχυση εδαφών. Στη συντριπτική πλειονοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται αιωρήματα ιπτάμενης τέφρας – τσιμέντου. Αιωρήματα που περιέχουν μόνο ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιούνται σαν φθηνά ενέματα χαμηλής αντοχής για την πλήρωση μεγάλων εγκοίλων στο υπέδαφος. Ενέσεις εμποτισμού με αιωρήματα ιπτάμενης τέφρας δεν έχουν αναπτυχθεί λόγω του γεγονότος ότι οι ιπτάμενες τέφρες με ποζολανικές ιδιότητες δεν αναπτύσσουν από μόνες τους σημαντική αντοχή. Όμως, οι “υδραυλικές” ιπτάμενες τέφρες, που περιέχουν αρκετή ποσότητα ασβεστίου ώστε να παρουσιάζουν ιδιότητες αυτοτσιμέντωσης, έχουν δυνατότητα ανάπτυξης αντοχών χωρίς την παρουσία τσιμέντου ή ασβέστου και φαίνεται ότι μπορούν να αξιοποιηθούν από μόνες τους σε ενέσεις εμποτισμού. Η εργαστηριακή διερεύνηση που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία αποτελεί μέρος εκτεταμένου ερευνητικού προγράμματος που είχε σαν στόχο τη δημιουργία ενός σχετικά λεπτόκοκκου υλικού από Ελληνική ιπτάμενη τέφρα (χωρίς την προσθήκη τσιμέντου ή ασβέστου), κατάλληλου για ενέσεις εμποτισμού τύπου αιωρήματος. Ειδικότερα, παρουσιάζονται αποτελέσματα σχετικά με τη βελτίωση που επιφέρει ο εμποτισμός με αιωρήματα ιπτάμενης τέφρας στα χαρακτηριστικά (διατμητική αντοχή και διαπερατότητα) και στις παραμέτρους παραμορφωσιμότητας των άμμων.

ΥΛΙΚΑ

Η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας επελέγη ως η πλέον κατάλληλη για την έρευνα αυτή διότι είναι άριστο ποζολανικό υλικό με υδραυλικές ιδιότητες που βελτιώνονται με τη λειοτρίβηση. Κονιάματα που αποτελούνται μόνο από ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας, αναπτύσσουν αντοχές ίσες με το 60% έως 70% αυτών που αναπτύσσουν παρόμοια μίγματα από κοινό τσιμέντο Portland στις 28 ημέρες (Papayianni 1987). Σκυροδέματα από ιπτάμενη τέφρα αναπτύσσουν αντοχές περίπου ίσες με το 40% των αντοχών των σκυροδεμάτων χωρίς ιπτάμενη τέφρα και ικανοποιητική αντοχή σε διάρκεια (Papayianni 1986). Η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας αποτελείται από τα ίδια οξείδια όπως και τα τσιμέντα σε διαφορετικές, όμως, συγκεντρώσεις. Το ποσοστό CaO που περιέχει αυτή η ιπτάμενη τέφρα (32%) θεωρείται υψηλό σε σχέση με άλλες απλά ποζολανικές ιπτάμενες τέφρες. Η υδραυλική δράση της σχετίζεται με την παρουσία σε αυτήν ελεύθερης ασβέστου και ενεργού πυριτίου τα οποία αντιδρούν και σχηματίζουν πυκνωμα C-S-H που επιφέρει αύξηση της αντοχής (Papayianni 1987). Η ιπτάμενη τέφρα λειοτριβήθηκε για να βελτιωθεί η ενεσιμότητα και η διεισδυτικότητα των αιωρημάτων της και για να αυξηθεί η υδραυλική δράση της. Η λειοτριβημένη ιπτάμενη τέφρα έχει ειδική επιφάνεια κατά Blaine μεγαλύτερη από $8300 \text{ cm}^2/\text{gr}$ και κοκκομετρική διαβάθμιση που φαίνεται στο Σχήμα 1. Στο Σχήμα 1 δίνονται και οι κοκκομετρικές καμπύλες διαφόρων τσιμέντων (Schwarz & Krizek 1992) και παρατηρείται ότι η λειοτριβημένη ιπτάμενη τέφρα υπερέχει σαφώς έναντι του κοινού τσιμέντου Portland, υστερεί όμως έναντι των τριών πιο γνωστών λεπτόκοκκων τσιμέντων για ενέσεις εμποτισμού.

Για την παρασκευή όλων των αιωρημάτων, χρησιμοποιήθηκε πόσιμο νερό βρύσης που θεωρείται κατάλληλο για το σκοπό αυτό. Για τη βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων των αιωρημάτων λειοτριβημένης ιπτάμενης τέφρας (ΛΙΤ) χρησιμοποιήθηκε ο υπερρευστοποιητής με την εμπορική ονομασία Rheobuild 2000 (για μείωση του ιξώδους και βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων) και το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) ως επιταχυντής πήξης (για μείωση του χρόνου πήξης και βελτίωση του ρυθμού ανάπτυξης της αντοχής). Το υδροξείδιο του νατρίου έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την επιτάχυνση της πήξης του υλικού για ενέσεις, MC-100, που είναι μια πολύ



Σχήμα 1. Κοκκομετρικές Καμπύλες Ιπτάμενης Τέφρας και Τσιμέντων

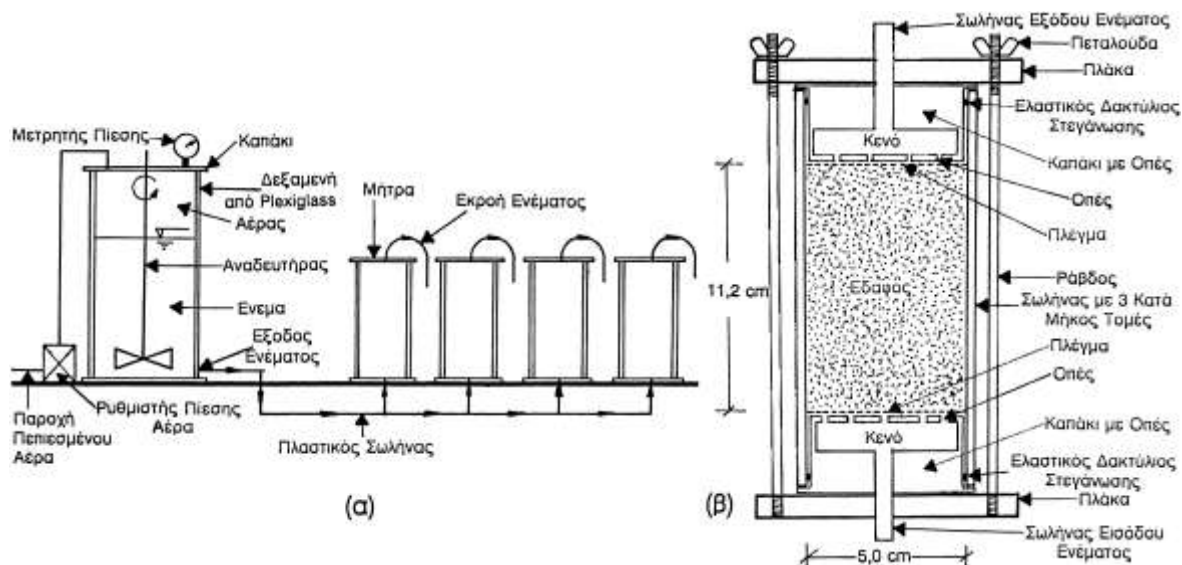
λεπτόκοκκη σκωρία (Schwarz & Krizek 1992, Weaver et al. 1990). Τα αιωρήματα ΛΙΤ που χρησιμοποιήθηκαν στους εμποτισμούς εδαφικών δοκιμών είχαν λόγο νερού προς στερεά (Ν/Σ) 1,5:1 κατά βάρος και περιείχαν 6 lt υπερρευστοποιητή και 2,5 kg επιταχυντή πήξης ανά 100 kg στερεών. Στον Πίνακα 1 συγκρίνονται οι ιδιότητες των συγκεκριμένων αιωρημάτων με αυτές αντίστοιχων αιωρημάτων τσιμέντου Portland II/35 και τριών λεπτόκοκκων τσιμέντων για ενέσεις εμποτισμού (Schwarz & Krizek 1992). Παρατηρείται ότι τα αιωρήματα ΛΙΤ παρουσιάζουν συγκρίσιμη ή και καλύτερη συμπεριφορά από τα αιωρήματα τσιμέντων και, επομένως, είναι κατάλληλα για ενέσεις εμποτισμού. Οι δύο άμμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των δοκιμών προέρχονταν από ποτάμιες αποθέσεις, ήταν καθαρές, με υπογωνιώδεις κόκκους και κοκκομετρικές διαβαθμίσεις που περιορίζονται μεταξύ των κοσκίνων (κατά ASTM) #4 ως #10 και #10 ως #16, αντίστοιχα. Οι γωνίες εσωτερικής τριβής, ϕ , των άμμων 4-10 και 10-16 σε πυκνή και ξηρή κατάσταση, είναι ίσες με $44,5^\circ$ και $46,5^\circ$, αντίστοιχα, και οι συντελεστές διαπερατότητάς τους σε πυκνή κατάσταση είναι ίσοι με 1,02 cm/s και 0,52 cm/s, αντίστοιχα.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Η προετοιμασία των αιωρημάτων γινόταν με ανάμιξη σε ταχύστροφο αναμικτήρα (10,000 rpm χωρίς φορτίο) που διαρκούσε 10 min. Η ειδική διάταξη που κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε

Πίνακας 1. Ιδιότητες Αιωρημάτων Λειοτριβημένης Ιπτάμενης Τέφρας Πτολεμαΐδας και Τσιμέντων

Υλικό	Λόγος Νερού / Στερεά	Φαινόμενο Ιξώδες (mPa·s)	Τελικός Ανηγγμένος Όγκος Νερού Εξίδρωσης	Χρόνοι Πήξης (ώρες)	
				Αρχικός	Τελικός
ΛΙΤ	1,5:1	9	0,10	16	33
Portland II/35	1,5:1	51	0,38	11	19
	2:1	21	0,47	12	20
MC-100	1:1	35	0,08	18	21
	2:1	4	0,12	56	---
MC-300	1:1	140	0,01	6	9
	2:1	40	0,03	13	27
MC-500	1:1	175	0,02	15	26
	2:1	6	0,15	24	49



Σχήμα 2. Διάταξη Εμποτισμού Δοκιμίων Άμμου

για τον εμποτισμό δοκιμίων άμμου, φαίνεται στο Σχήμα 2. Κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή της ακολουθήθηκαν οι οδηγίες του πρότυπου ASTM D4320-84. Η κυλινδρική επιφάνεια κάθε μήτρας έχει τρεις κατά μήκος τομές, ώστε να διευκολύνεται η εξαγωγή του εμποτισμένου δοκιμίου χωρίς κοπή, απόξεση ή άλλη ενέργεια. Τα δοκίμια είχαν ύψος 11,2 cm και διάμετρο 5 cm. Οι άμμοι εμποτίστηκαν σε πυκνή κατάσταση (σχετική πυκνότητα, D_r , ίση με 97% ως 98%) και σε κορεσμένη (βαθμός κορεσμού, $S_r=100\%$) ή ξηρή ($S_r=0\%$) κατάσταση. Η ροή ενέματος γινόταν υπό πίεση που δεν ξεπερνούσε τα 200 kPa και συνεχιζόταν μέχρι να περάσει μέσα από τα κενά του δοκιμίου ένεμα με όγκο ίσο με το διπλάσιο του όγκου κενών του δοκιμίου. Τα εμποτισμένα δοκίμια έμεναν μέσα στις κλειστές μήτρες για 2 ημέρες, στη συνέχεια εξάγονταν από τις μήτρες, τοποθετούνταν σε πλαστικές σακούλες και βυθίζονταν σε νερό ως την ημερομηνία εργαστηριακού ελέγχου τους. Μετά από περίοδο συντήρησης ίση με 28 ημέρες, τα εμποτισμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης “χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση” (UU) και “με στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση και με μετρήσεις της πίεσης νερού πόρων” (CU-PP) καθώς και σε δοκιμές διαπερατότητας. Μετά από συντήρηση 70 μηνών, τα εμποτισμένα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης “πολλαπλών σταδίων” (M-UU).

Οι δοκιμές τριαξονικής φόρτισης UU εκτελέστηκαν χωρίς κορεσμό των δοκιμίων, με πλευρικές πιέσεις ίσες με 100, 200 και 400 kPa και με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης ίσο με 0,05 mm/min. Για την εκτέλεση των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης CU-PP, εφαρμόστηκαν οι διαδικασίες που περιγράφονται από τον Head (1986). Αφού επιβεβαιωνόταν ο κορεσμός, τα δοκίμια υποβάλλονταν σε στερεοποίηση υπό ενεργές πλευρικές πιέσεις, σ'_3 , ίσες με 100, 200 και 400 kPa και κατόπιν σε φόρτιση με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης ίσο με 0,05 mm/min. Οι δοκιμές διαπερατότητας εκτελέστηκαν σε συνδυασμό με τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης CU-PP, με χρήση δύο συστημάτων εσωτερικής πίεσης, σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται από τον Head (1986). Οι δοκιμές αυτές παρεμβάλλονταν μεταξύ των σταδίων στερεοποίησης και φόρτισης των δοκιμών τριαξονικής φόρτισης CU-PP. Τέλος, οι δοκιμές τριαξονικής φόρτισης M-UU εκτελέστηκαν χωρίς κορεσμό των δοκιμίων, σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται από τον Head (1982), σε τρία διαδοχικά στάδια με αντίστοιχες πλευρικές πιέσεις ίσες με 100, 200 και 400 kPa και με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης ίσο με 0,05 mm/min.

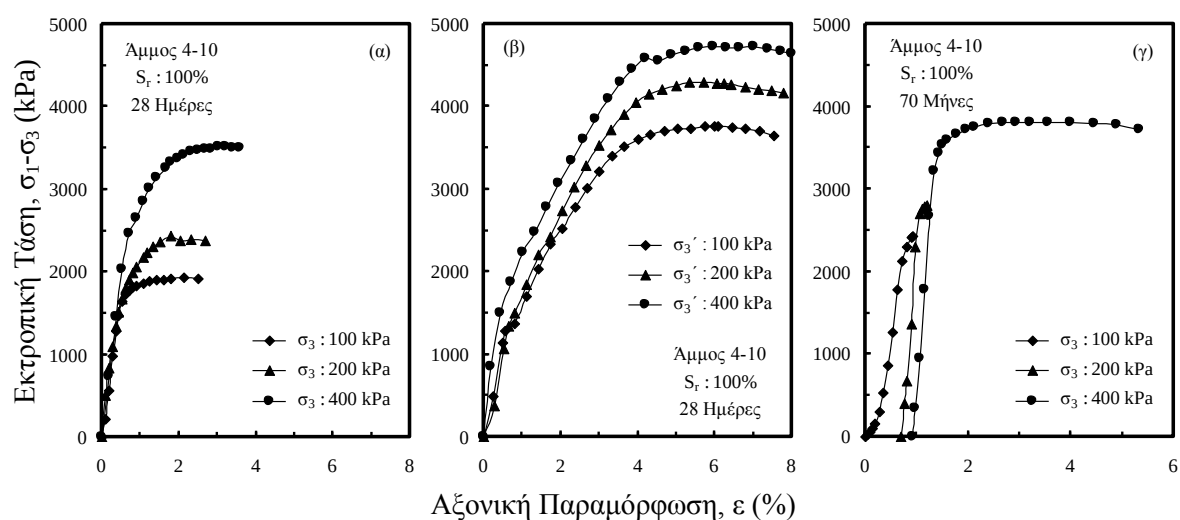
Πίνακας 2. Διαπερατότητα Εμποτισμένων Άμμων με Ενέματα Λειοτριβημένης Ιπτάμενης Τέφρας

Άμμος	Συντελεστής Διαπερατότητας Άμμου k (cm/s)	Ενεργός Πλευρική Πίεση σ_3' (kPa)	Συντελεστής Διαπερατότητας Εμποτισμένης Άμμου k (cm/s)
4-10 $S_r=0\%$ *	1	100	$5 \cdot 10^{-7}$
		200	$3 \cdot 10^{-5}$
		400	$3 \cdot 10^{-7}$
10-16 $S_r=0\%$	$5 \cdot 10^{-1}$	100	$6 \cdot 10^{-6}$
		200	$5 \cdot 10^{-6}$
		400	$1 \cdot 10^{-6}$
4-10 $S_r=100\%$	1	100	$2 \cdot 10^{-6}$
		200	$1 \cdot 10^{-6}$
		400	$8 \cdot 10^{-7}$
10-16 $S_r=100\%$	$5 \cdot 10^{-1}$	100	$3 \cdot 10^{-5}$
		200	$6 \cdot 10^{-6}$
		400	$1 \cdot 10^{-6}$

*Βαθμός κορεσμού δοκιμίων άμμου πριν τον εμποτισμό.

ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι εμποτισμένες άμμοι με αιωρήματα ΛΙΤ έχουν συντελεστές διαπερατότητας με τιμές που κυμαίνονται από $3 \cdot 10^{-5}$ cm/s ως $3 \cdot 10^{-7}$ cm/s. Η βελτίωση των συντελεστών διαπερατότητας των άμμων λόγω του εμποτισμού κυμαίνεται από 4 ως 7 τάξεις μεγέθους. Δημοσιευμένες τιμές της διαπερατότητας σταθεροποιημένων εδαφών με διάφορες ιπτάμενες τέφρες με ιδιότητες αυτοοσιμέντωσης (Parker et al. 1977, Vesperman et al. 1984, Edil et al. 1987) δείχνουν ότι η διαπερατότητα των άμμων μπορεί να μειωθεί από 3 ως 4 τάξεις μεγέθους και ο συντελεστής διαπερατότητας μπορεί να πάρει τιμές που φθάνουν μέχρι και τα $2 \cdot 10^{-8}$ cm/s.



Σχήμα 3. Τυπικές Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεων από Δοκιμές Τριαξονικής Φόρτισης (α) Δοκιμές UU, (β) Δοκιμές CU-PP και (γ) Δοκιμές M-UU

Πίνακας 3. Παράμετροι Παραμορφωσιμότητας Υλικών

Υλικό	Τύπος Δοκιμής	Πλευρική Πίεση σ_3 (kPa)	Μέτρα Ελαστικότητας		Παραμόρφωση Αστοχίας ε_a (%)
			Εφαπτομενικό E_{ϕ} (MPa)	Χορδής E_{50} (MPa)	
Αιωρήματα ΛΙΤ $N/\Sigma=1,5:1$	UU	100	167	226	1,8
		200	256	338	1,4
		400	210	356	1,6
Άμμος 4-10 Καθαρή $S_r=0\%$	UU	100	118	103	3,7
		200	160	122	6,3
		400	182	135	6,9
Άμμος 10-16 Καθαρή $S_r=0\%$	UU	100	114	88	4,6
		200	179	99	4,6
		400	250	135	6,2
Άμμος 4-10 Εμποτισμένη $N/\Sigma=1,5:1$	UU	100	615	357	2,1
		200	444	451	1,8
		400	400	391	3,0
$S_r=100\%$	CU-PP	500	286	146	6,0
		600	238	172	5,7
		800	455	197	6,0
Άμμος 4-10 Εμποτισμένη $N/\Sigma=1,5:1$	UU	100	595	414	1,1
		200	610	477	1,8
		400	649	516	2,9
$S_r=0\%$	CU-PP	500	333	218	5,3
		600	333	241	5,3
		800	455	321	5,6
Άμμος 10-16 Εμποτισμένη $N/\Sigma=1,5:1$	UU	100	408	297	1,1
		200	417	361	2,0
		400	435	401	3,8
$S_r=100\%$	CU-PP	500	357	178	6,0
		600	278	165	6,2
		800	500	192	6,3
Άμμος 10-16 Εμποτισμένη $N/\Sigma=1,5:1$	UU	100	544	442	0,7
		200	510	507	1,5
		400	633	601	2,2
$S_r=0\%$	CU-PP	500	333	226	5,4
		600	333	221	6,8
		800	333	242	6,5

Δημοσιευμένες τιμές της διαπερατότητας που προέκυψαν για άμμους εμποτισμένες με διάφορα αιωρήματα λεπτόκοκκων τσιμέντων (Legendre et al. 1987, Zebovitz et al. 1989, De Paoli et al. 1992) δείχνουν ότι η διαπερατότητα πιο λεπτόκοκκων άμμων από αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα αυτή, βελτιώθηκε κατά 3 ως 5 τάξεις μεγέθους. Συνεπώς, ο εμποτισμός με αιωρήματα ΛΙΤ οδήγησε σε αποτελέσματα που είναι συγκρίσιμα ή ακόμα και καλύτερα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάμιξη ή τον εμποτισμό άμμων με άλλους τύπους ιπτάμενων τεφρών ή ενεμάτων τύπου αιωρήματος.

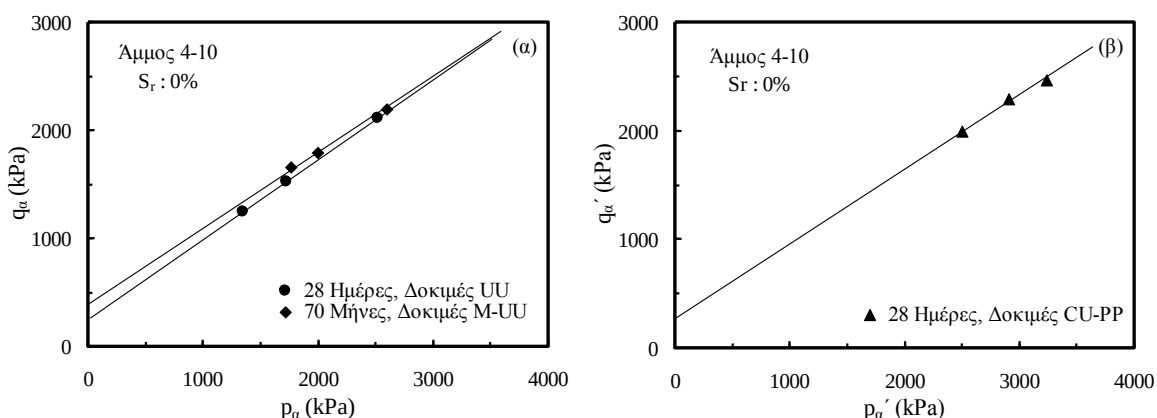
ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων που προέκυψαν από τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης που εκτελέστηκαν στα πλαίσια αυτής της έρευνας. Η μορφή των καμπυλών του Σχήματος 3γ υποδηλώνει ότι η συμπεριφορά των δοκιμών εμποτισμένης άμμου κατά τις δοκιμές M-UU ήταν ομαλή και, επομένως, τα αποτελέσματά των δοκιμών αυτών πρέπει να θεωρούνται αξιόπιστα. Οι τιμές των τριών παραμέτρων παραμορφωσιμότητας του αιωρήματος ΛΙΤ και των άμμων πριν και μετά τον εμποτισμό που προέκυψαν από τις καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των δοκιμών UU και CU-PP, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Παρατηρείται ότι,

στις εμποτισμένες άμμους, ο τύπος δοκιμής επηρεάζει τις παραμέτρους αυτές, αφού οι δοκιμές UU δίδουν κατά μέσο όρο: (α) 3 φορές χαμηλότερες παραμορφώσεις αστοχίας, (β) 1,5 φορά υψηλότερα εφαπτομενικά μέτρα ελαστικότητας, και (γ) 2 φορές υψηλότερα μέτρα ελαστικότητας χορδής από τις δοκιμές CU-PP. Από τη σύγκριση των παραμέτρων παραμορφωσιμότητας των εμποτισμένων άμμων, που προέκυψαν από δοκιμές UU, με αυτές του αιωρήματος ΛΙΤ και των καθαρών άμμων (Πιν. 3), παρατηρείται ότι: (α) η παραμόρφωση αστοχίας των εμποτισμένων άμμων είναι παρόμοια με αυτή του αιωρήματος ΛΙΤ και 3 φορές χαμηλότερη από αυτή των καθαρών άμμων, (β) το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας των εμποτισμένων άμμων είναι υψηλότερο από αυτά των καθαρών άμμων και του αιωρήματος ΛΙΤ κατά 3–4 και 2–3 φορές, αντίστοιχα, και (γ) το μέτρο ελαστικότητας χορδής των εμποτισμένων άμμων είναι υψηλότερο από αυτά των καθαρών άμμων και του αιωρήματος ΛΙΤ κατά 4 φορές και 1,5 φορά, αντίστοιχα. Επομένως, φαίνεται ότι ο εμποτισμός με αιωρήματα ΛΙΤ οδηγεί σε αύξηση της ακαμψίας και σε μείωση της παραμορφωσιμότητας των άμμων. Η συμπεριφορά αυτή έχει επίσης διαπιστωθεί για άμμους εμποτισμένες με ενέματα άλλων τύπων (Krizek et al. 1982, 1986, 1992).

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται τυπικές περιβάλλουσες αστοχίας (γραμμές K_a) που προέκυψαν για το ίδιο εμποτισμένο έδαφος από δοκιμές UU και M-UU (ολικές τάσεις) (Σχ. 4α) και από δοκιμές CU-PP (ενεργές τάσεις) (Σχ. 4β). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb αντιπροσωπεύει επαρκώς τη συμπεριφορά της εμποτισμένης άμμου με αιωρήματα ΛΙΤ. Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε και για άλλα ενέματα (Krizek et al. 1982, 1986, 1992). Οι τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής που προέκυψαν από όλες τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης σε δοκίμια άμμου εμποτισμένης με αιωρήματα ΛΙΤ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Παρατηρείται ότι η βελτίωση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής των εμποτισμένων άμμων με αιωρήματα ΛΙΤ, συνίσταται κυρίως στην ανάπτυξη συνοχής και όχι σε σημαντική αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής τους. Οι τιμές της συνοχής σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών, κυμαίνονται από 283 kPa ως 446 kPa (ανάλυση ολικών τάσεων) και από 285 kPa ως 385 kPa (ανάλυση ενεργών τάσεων). Αυτές οι τιμές της συνοχής είναι υψηλότερες από τις τιμές που προέκυψαν από τον εμποτισμό με το λεπτόκοκκο τσιμέντο MC-500, $c' \leq 150$ kPa, (Krizek et al. 1986) και με πυριτικό νάτριο, $c' = 226$ -294 kPa, (Krizek et al. 1982) και είναι συγκρίσιμες με τις τιμές που προέκυψαν από τον εμποτισμό με μίγματα MC-500 – πυριτικού νατρίου, $c' = 139$ -456 kPa, (Krizek et al. 1992). Σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών, η γωνία εσωτερικής τριβής που προέκυψε από τις δοκιμές UU είναι μεγαλύτερη κατά 5° , περίπου, από αυτή της άμμου, ενώ στις δοκιμές CU-PP, η γωνία εσωτερικής τριβής της εμποτισμένης άμμου έχει περίπου ίδιες τιμές με αυτή της καθαρής άμμου.



Σχήμα 4. Τυπικές Περιβάλλουσες Αστοχίας Εμποτισμένων Άμμων με Αιώρημα ΛΙΤ

Πίνακας 4. Παράμετροι Διατμητικής Αντοχής Εμποτισμένων Άμμων

Άμμος	Βαθμός	Δοκίμια 28 Ημερών		Δοκίμια 28 Ημερών		Δοκίμια 70 Μηνών	
	Κορεσμού	Δοκιμές CU-PP		Δοκιμές UU		Δοκιμές M-UU	
	S _r (%)	c' (kPa)	φ' (°)	c (kPa)	φ (°)	c (kPa)	φ (°)
4-10	0	385	44,5	380	49,0	561 (48%)*	44,5
10-16	0	321	45,5	446	48,0	463 (4%)*	44,5
4-10	100	285	45,5	283	48,0	407 (44%)*	44,5
10-16	100	321	45,5	291	46,5	363 (25%)*	46,5

*Αύξηση συνοχής σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή από δοκιμές UU σε δοκίμια 28 ημερών.

Παρόμοιες σχετικά χαμηλές ευεργετικές επιδράσεις του εμποτισμού στη γωνία εσωτερικής τριβής των άμμων έχουν παρατηρηθεί και για άλλους τύπους ενεμάτων (Krizek et al. 1982, 1986, 1992) και μπορούν να αποδοθούν στην παρουσία του ενέματος που παρεμποδίζει την κίνηση των κόκκων της άμμου. Σε δοκίμια ηλικίας 70 μηνών (δοκιμές M-UU), οι τιμές της συνοχής κυμαίνονται από 363 kPa ως 561 kPa, ενώ οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής είναι και πάλι περίπου ίσες με αυτές των καθαρών άμμων. Η αύξηση της συνοχής των εμποτισμένων άμμων στο διάστημα από τις 28 ημέρες ως τους 70 μήνες, θεωρείται ικανοποιητική αφού κυμαίνεται από 4% ως 48% (Πιν. 4) και είναι κατά μέσο όρο ίση με 30%. Από όλα τα παραπάνω φαίνεται ότι η βελτίωση που προκαλεί ο εμποτισμός με αιωρήματα ΛΙΤ στις παραμέτρους διατμητικής αντοχής της άμμου μπορεί να χαρακτηριστεί ως σημαντική συγκριτικά και με άλλα γνωστά ενέματα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν και τις παρατηρήσεις που έγιναν στα πλαίσια αυτής της εργαστηριακής έρευνας, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η βελτίωση της διαπερατότητας της άμμου που προκαλείται από τον εμποτισμό με αιωρήματα ΛΙΤ κυμαίνεται από 4 ως 7 τάξεις μεγέθους και είναι συγκρίσιμη ή και καλύτερη από αυτή που προκύπτει από τον εμποτισμό άμμων με άλλους τύπους ενεμάτων τύπου αιωρήματος.
- Ο εμποτισμός με αιωρήματα ΛΙΤ οδηγεί σε αύξηση της ακαμψίας και σε μείωση της παραμορφωσιμότητας των άμμων.
- Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά της εμποτισμένης άμμου με αιωρήματα ΛΙΤ και δίδει τιμές συνοχής που κυμαίνονται από 280 kPa ως 560 kPa και είναι συγκρίσιμες ή και υψηλότερες από αυτές που προέκυψαν από άμμους εμποτισμένες με άλλα ενέματα. Η γωνία εσωτερικής τριβής είναι περίπου ίση με αυτή των καθαρών άμμων.
- Στο χρονικό διάστημα μεταξύ 28 ημερών και 70 μηνών, παρατηρείται ικανοποιητική (4% ως 48% ή 30% κατά μέσο όρο) αύξηση της συνοχής της εμποτισμένης άμμου με αιωρήματα ΛΙΤ.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. De Paoli, B. Bosco, B. Granata, R. & Bruce, D.A. 1992. Fundamental observations on cement based grouts (2): Microfine cements and the Cemill^R process. *Proc., Grouting, Soil Improvement & Geosynthetics*, New Orleans, ASCE, Vol. 1: 486-499.
2. Edil, T.B. Berthouex, P.M. & Vesperman, K.D. 1987. Fly ash as a potential waste liner. *Proc., Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, Ann Arbor, ASCE, 447-461.
3. Head, K.H. 1982. *Manual of soil laboratory testing*. Vol. 2, London: Pentech Press Ltd.

4. Head, K.H. 1986. *Manual of soil laboratory testing*. Vol. 3, London: Pentech Press Ltd.
5. Krizek, R.J. Benltayf, M.A. & Atmatzidis, D.K. 1982. Effective stress – strain – strength behavior of si-licate-grouted sand. *Proc., Grouting in Geotech. Engineering*, New Orleans, ASCE, Vol.1: 482-497.
6. Krizek, R.J. Atmatzidis, D.K. & Wu, Z.H. 1986. *Behavior of grouted Erksak sand*. Northwestern Univ.
7. Krizek, R.J. Liao, H.-J. & Borden, R.H. 1992. Mechanical properties of microfine cement / sodium silicate grouted sand. *Proc., Grouting, Soil Improvement & Geosynthetics*, New Orleans, ASCE, Vol. 1: 688-699.
8. Legendre, Y. Hery, P. & Vatteement, H. 1987. Microsol grouting, a method for grouting fine allu-vium. *Proc., 6th Int. Offshore Mech. & Arctic Engrg. Symp.*, Houston, ASME, Vol. 1: 433-440.
9. Papayianni, J. 1986. Strength & bond data for Greek high-lime fly ash concrete. *Proc., Fly Ash, Si-lica Fume, Slag & Natural Pozzolans in Concrete, 2nd Int. Conf.*, Madrid, ACI, Vol.1: 367-386.
10. Papayianni, J. 1987. An investigation of the pozzolanicity and hydraulic reactivity of a high-lime fly ash. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 39, No. 138: 19-27.
11. Parker, D.G. Thornton, S.I. & Cheng, C.W. 1977. Permeability of fly ash stabilized soils. *Proc., Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, Ann Arbor, ASCE, 63-70.
12. Schwarz, L.G. & Krizek, R.J. 1992. Effects of mixing on rheological properties of microfine ce-ment grout. *Proc., Grouting, Soil Impr. & Geosynthetics*, New Orleans, ASCE, Vol. 1: 512-525.
13. Vesperman, K.D. Edil, T.B. & Berthouex, P.M. 1984. Permeability of fly ash and fly ash – sand mixtures. *Proc., Symposium of Hydraulic Barriers in Soil and Rock*, Denver, ASTM, 289-298.
14. Weaver, K.D. Evans, J.C. & Pancoski, S.E. 1990. Grout testing for a hazardous waste application. *Concrete International*, Vol. 12, No. 7: 45-47.
15. Zebovitz, S. Krizek, R.J. & Atmatzidis, D.K. 1989. Injection of fine sands with very fine cement grout. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 12: 1717-1733.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΑΡΓΙΛΟΥΧΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΣΙΔΗΡΑΛΟΥΜΙΝΑΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ BAYER

Ι. Ποντίκης, Ι. Βαγγελάτος, Γ. Ν. Αγγελόπουλος*, Π. Νικολόπουλος⁰,

**Εργαστήριο «Υλικών και Μεταλλουργίας» και ⁰Εργαστήριο «Κεραμικών και Σύνθετων Υλικών»,
Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504 Ρίο*

H. Lee, U. Kim, W. Carty

New York State College of Ceramics at Alfred University, Alfred, New York 14802

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η «Σιδηραλουμίνα» (ΣΑ) προκύπτει μετά την απομάκρυνση του νερού από την Ερυθρά Ιλύ, το κύριο παραπροϊόν της διεργασίας Bayer. Στοχεύοντας στην αξιοποίηση μέρους των περίπου 700.000t ΣΑ που παράγονται ετησίως στην Ελλάδα στην παραγωγή παραδοσιακών δομικών κεραμικών, μελετήθηκε η πλαστικότητα αργιλούχων μίγμάτων με ΣΑ με την τεχνική, “High Pressure Annular Shear Cell” (HPASC). Από τα αποτελέσματα προκύπτει η συνοχή (cohesion) του μίγματος και η εξάρτηση από την ασκούμενη πίεση (pressure dependence), δεδομένα από τα οποία προβλέπεται η βέλτιστη περιεκτικότητα σε νερό για μορφοποίηση. Τα αποτελέσματα για 30%κβ προσθήκη ΣΑ, υποκαθιστώντας το αργιλούχο μίγμα, είναι ικανοποιητικά αφού η μέγιστη συνοχή του μίγματος είναι υψηλή. Εντούτοις απαιτείται περισσότερο νερό για την επίτευξη των προβλεπόμενων τιμών συνοχής και εξάρτησης από την ασκούμενη πίεση για εξώθηση, γεγονός το οποίο δημιουργεί αυξημένες ανάγκες ξήρανσης. Με μετατόπιση της κοκκομετρίας προς μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων, επανασχεδιασμό του αργιλούχου μίγματος ή προσθήκη πολυμερών μπορεί να επιτευχθεί ρύθμιση της ρεολογικής συμπεριφοράς του μίγματος.

Λέξεις κλειδιά: ερυθρά ιλύς, σιδηραλουμίνα, πλαστικότητα, παραδοσιακά κεραμικά

ON THE PLASTICITY OF CLAY MIXTURES WITH RESIDUAL BAUXITE OF THE BAYER PROCESS

Y. Pontikes, I. Vangelatos, G. N. Angelopoulos^{*}, P. Nikolopoulos⁰,

*^{*}Laboratory of “Materials and Metallurgy”, ⁰Laboratory of “Ceramics and Composite Materials”,
Dept. of Chemical Engineering, University of Patras, 26504, Rio*

H. Lee, U. Kim, W. Carty

New York State College of Ceramics at Alfred University, 14802, Alfred, New York

ABSTRACT: Residual Bauxite (RB) is being produced after dewatering of Red Mud, the main by-product of Bayer process. Aiming to utilise in the heavy clay industry part of the 700.000t/y of RB produced in Greece, the plasticity of clay mixtures with RB was studied by the “High Pressure Annular Shear Cell” (HPASC) technique. The information obtained is cohesion and pressure dependence values that enable the determination of optimal conditions for extrusion. The results for 30wt% addition RB in the clay mixture demonstrate that the maximum cohesion is increased. Nevertheless, the water demand is also increased for achieving the appropriate cohesion and pressure dependence levels for extrusion, a factor that imposes increased demand for drying. By shifting the particle size distribution towards a higher mean particle size, redesigning the clay mixture or by polymer addition, the rheological behaviour of the plastic body can be adjusted.

Keywords: red mud, residual bauxite, plasticity, traditional ceramics

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η «Σιδηραλουμίνα» (ΣΑ) ή «Υπόλειμμα Βωξίτη» είναι το προϊόν που προκύπτει μετά την απομάκρυνση του νερού από την Ερυθρά Ιλύ, η οποία είναι και το κύριο παραπροϊόν της διεργασίας Bayer. Η απόθεση της Ερυθρά Ιλύος παραμένει ένα πρακτικά άλυτο πρόβλημα [Hind *et al.*, 1999, Agrawal *et al.*, 2004] και ελάχιστες αναφορές υπάρχουν παγκοσμίως για την βιομηχανική αξιοποίηση του υλικού [www.redmud.org].

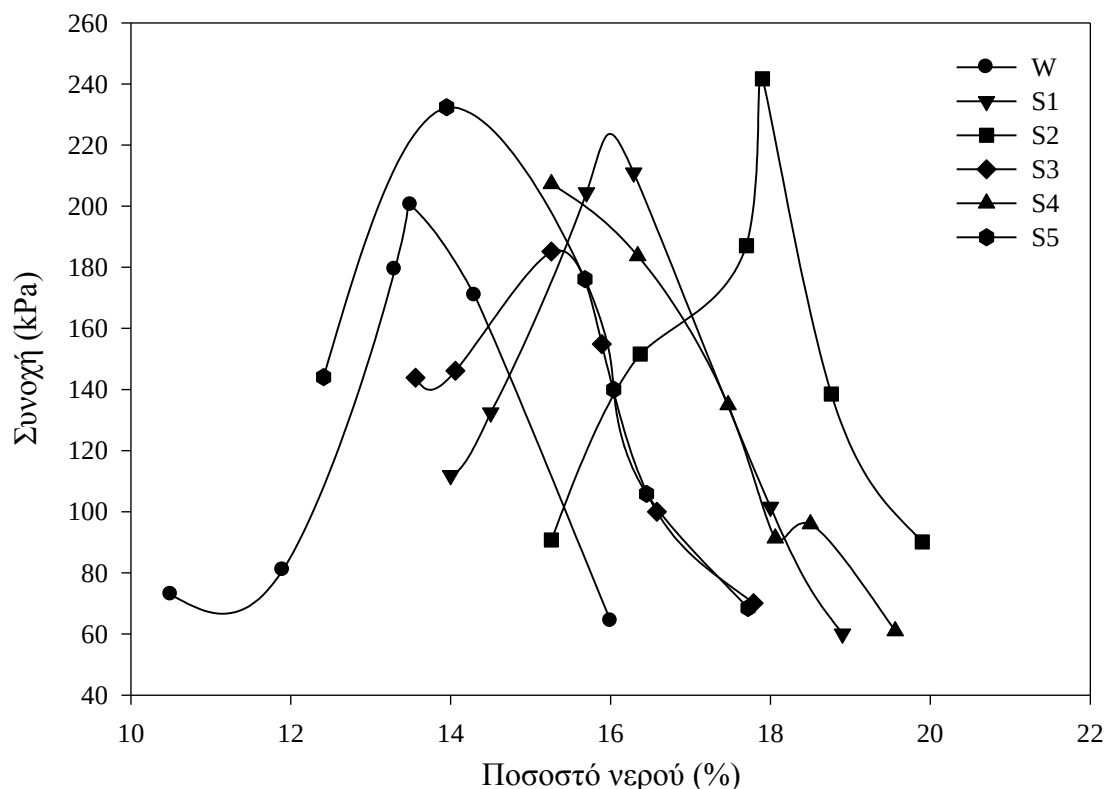
Στοχεύοντας στην αξιοποίηση της ΣΑ σε βιομηχανίες μαζικής παραγωγής, όπως αυτή των δομικών παραδοσιακών κεραμικών, κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η διεργασία της μορφοποίησης. Προσθήκη ΣΑς σε ένα αργιλούχο μίγμα θα επηρεάσει πρακτικά όλες τις παραμέτρους που καθορίζουν τη ρεολογία της πλαστικής μάζας και σχετίζονται με τη στερεά φάση, δηλ. αλληλεπιδράσεις σωματιδίων, συγκέντρωση σωματιδίων, μορφολογία, μέγεθος αλλά και κοκκομετρική κατανομή αυτών. Για να ερευνηθεί η επίδραση αυτών των παραμέτρων εξετάστηκε η πλαστικότητα αργιλούχων μιγμάτων και ΣΑ σε συνδυασμό με προσθήκη πολυμερών.

Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η τεχνική “High Pressure Annular Shear Cell” (HPASC) [Nowak, 1995, Lee, 1995, Carty and Lee, 1996]. Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στη θεώρηση ότι οι πλαστικές μάζες συμπεριφέρονται σαν ρευστά Bingham, δηλαδή Νευτώνεια με τάση διαρροής (yield stress). Πειραματικά, δίνεται η δυνατότητα άμεσης μέτρησης των διατμητικών τάσεων που ασκούνται σε μια πλαστική μάζα κάτω από την επίδραση μιας εξωτερικά επιβαλλόμενης πίεσης, σε αντιστοιχία με τις συνθήκες κατά τη μορφοποίηση. Η εξάρτηση είναι γραμμική και καθώς η πίεση αυξάνει η διατμητική τάση αυξάνει επίσης. Από το διάγραμμα διατμητικής τάσης και εφαρμοζόμενης πίεσης προκύπτει η συνοχή του μίγματος, ως το σημείο τομής της ευθείας με τον άξονα της διατμητικής τάσης, αλλά και η εξάρτηση από την πίεση, ως η κλίση. Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν τον υπολογισμό των βέλτιστων συνθηκών για την εξώθηση.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το αργιλούχο μίγμα αναφοράς σχεδιάστηκε ούτως ώστε να προσομοιάζει ορυκτολογικά, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, ένα τυπικό ιταλικό μίγμα για παραγωγή δομικών κεραμικών (πχ. κεραμίδα). Αποτελείται από καολινίτη-ιλλίτη, χαλαζία, K-Αστριο και καλσίτη και φέρει την ονομασία W. Το μίγμα S1 αποτελείται από 70%κβ W και 30%κβ ΣΑ. Το μίγμα S2 αποτελείται από 30%κβ ΣΑ και έχουν τροποποιηθεί ποσοτικά τα υπόλοιπα ορυκτά. Για τον επανασχεδιασμό λήφθηκε υπόψη ότι η ΣΑ δεν έχει ουσιαστικά αργιλικά ορυκτά και έτσι το μίγμα S2 έχει το ίδιο ποσοστό σε αργιλικά ορυκτά με το αναφοράς W. Το μίγμα S3 είναι αντίστοιχο του S1 με τη διαφορά ότι έχει χρησιμοποιηθεί χονδρόκοκκος χαλαζίας. Το μίγμα S4 είναι όπως το S1 αλλά προστέθηκε υψηλού ιξώδους carboxymethylcellulose, CMC, (C-5013, Sigma, USA) διαδελυμένη στο νερό σε συγκέντρωση 10g/l. Το μίγμα S5 είναι και αυτό αντίστοιχο του S1, αλλά στην περίπτωση αυτή προστέθηκε Na-PAA (Darvan 811, R. T. Vanderbilt Co., USA) σε συγκέντρωση ~0.89mg/m². Στον πίνακα 1 δίνεται συνοπτικά η ποσοτική ορυκτολογική σύσταση των μιγμάτων και σχόλια για την παρασκευή τους.

Για την παρασκευή των μιγμάτων, οι πρώτες ύλες αναμίχθηκαν, κονιορτοποιήθηκαν και με κοσκίνηση εξασφαλίστηκε μέγεθος κόκκων <500μm, με την εξαίρεση του χονδρόκοκκου χαλαζία που χρησιμοποιήθηκε για το S3. Ακολούθησε ξηρή ανάμιξη και κατόπιν με προσθήκη απιονισμένου νερού, στο προβλεπόμενο ποσοστό, σε αναμικτήριο τύπου «σίγμα». Για κάθε μίγμα που σχεδιάστηκε, 6 διαφορετικές πλαστικές μάζες παρήχθησαν με μεταβαλλόμενο ποσοστό νερού



Εικόνα 1. Εξάρτηση της συνοχής από το ποσοστό νερού. Υψηλές τιμές συνοχής για μικρό ποσοστό νερού εμφάνισαν τα μίγματα W και S5.

(36 στο σύνολο). Οι πλαστικές μάζες τοποθετήθηκαν για 48h εντός πλαστικής σακούλας η οποία κλείστηκε ερμητικά για να αποτραπεί η απώλεια υγρασίας. Ακολούθησε η μέτρηση με τη συσκευή HPASC. Το ποσοστό νερού μετρήθηκε μετά τη μέτρηση και εκφράζεται επί του μίγματος.

Πίνακας 1. Οι συνθέσεις των μιγμάτων που παρασκευάστηκαν και συμπληρωματικές παρατηρήσεις

	W (%κβ)	S1 (%κβ)	S2 (%κβ)	S3 (%κβ)	S4 (%κβ)	S5 (%κβ)
Αργιλικά	50	35	50	35	35	35
Χαλαζίας						
-λεπτόκοκκος	40	28	20		28	28
-χονδρόκοκκος				28		
Καλσίτης	5	3.5	0	3.5	3.5	3.5
Κ-Άστριος	5	3.5	0	3.5	3.5	3.5
ΣΑ	0	30	30	30	30	30
Παρατηρήσεις	Μίγμα αναφοράς	Με προσθήκη ΣΑ, «ως έχει»	Με προσθήκη ΣΑ και αλλαγή στα ποσοστά των ορυκτών	Με προσθήκη ΣΑ και άλλη κοκκομετρία χαλαζία	Με προσθήκη ΣΑ και CMC	Με προσθήκη ΣΑ και Na-PAA

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

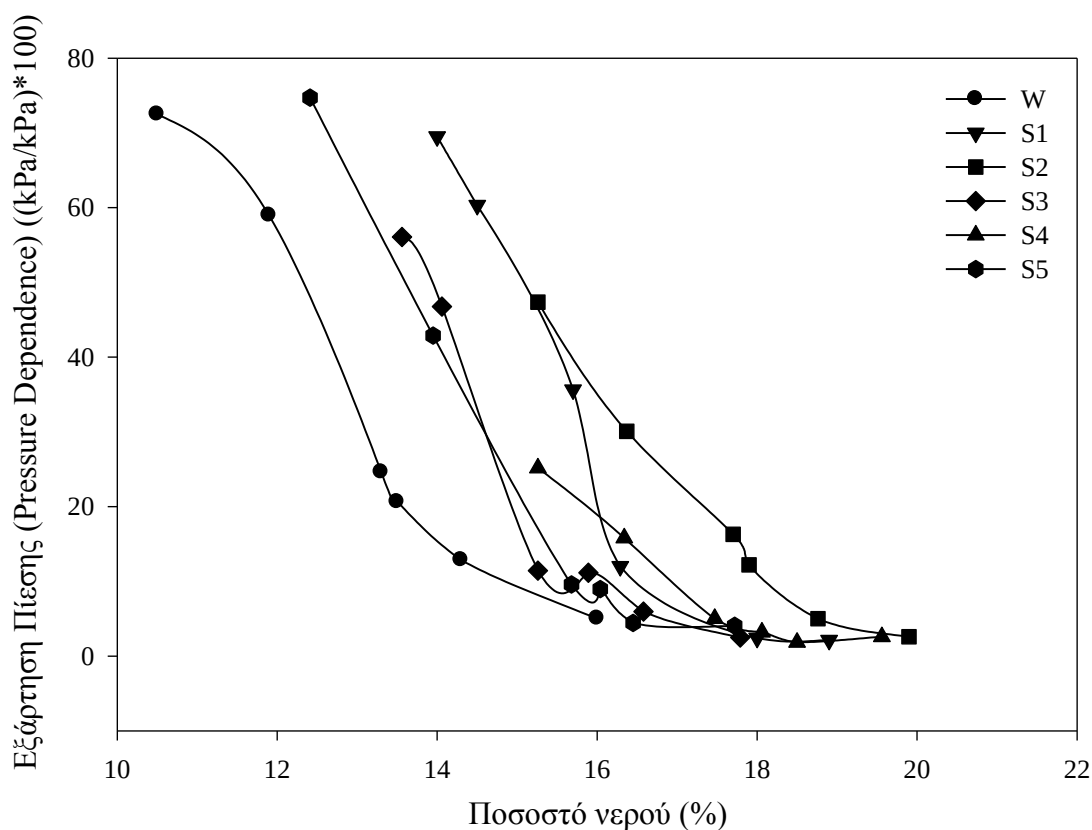
Συνοχή συναρτήσει Ποσοστού Νερού

Σαν φυσική έννοια η συνοχή μπορεί να συσχετιστεί με την ικανότητα διαμόρφωσης της πλαστικής μάζας – μικρότερη συνοχή συνεπάγεται πιο εύπλαστη μάζα και μεγαλύτερη εργασιμότητα (workability). Στην Εικόνα 1 φαίνεται η εξάρτηση της συνοχής από το ποσοστό νερού για τα 6 μίγματα. Το μέγιστο αντιπροσωπεύει το ποσοστό νερού που απαιτείται για κορεσμό των κενών όγκων μεταξύ των σωματιδίων, διόγκωση των αργιλικών ορυκτών κτλ και σχετίζεται με την ειδική επιφάνεια του μίγματος. Η μέγιστη τιμή της συνοχής είναι συνάρτηση της διευθέτησης των σωματιδίων (particle packing), των τριχοειδών δυνάμεων που αναπτύσσονται στους μερικώς κορεσμένους πόρους και τέλος των δυνάμεων που αλληλεπιδρούν μεταξύ των σωματιδίων [Carty *et al.*, 1998]. Σε αυτή την περιεκτικότητα νερού, το μέγεθος “Degree of Pore Saturation” («Βαθμός Πλήρωσης Πόρων»), το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του υγρού προς τον όγκο μεταξύ των σωματιδίων, των πόρων, κτλ., προσεγγίζει τη μονάδα. Για $DPS=1$, εφαρμογή εξωτερικών τάσεων στην πλαστική μάζα δε θα επιφέρει συμπίεση καθώς δεν υπάρχουν κενοί όγκοι για την ανακατανομή των σωματιδίων. Θεωρητικά λοιπόν, η εξώθηση πρέπει να πραγματοποιείται για $DPS < 1$ αν και η πράξη έχει δείξει ότι μεγαλύτερη περιεκτικότητα νερού ίσως να διευκολύνει την αμοιβαία ολίσθηση και κύλιση των σωματιδίων συντελώντας στην καλύτερή τους διευθέτηση.

Το μίγμα αναφοράς W έφτασε μέγιστη συνοχή της τάξης των 200 kPa για ποσοστό νερού 13.5%. Για ποσοστό νερού άνω του 14.3% παρουσιάζεται σημαντική πτώση στη συνοχή του μίγματος καθώς το σύστημα αρχίζει να προσεγγίζει την υδαρή κατάσταση. Προσθήκη ΣΑ στο μίγμα S1 οδήγησε σε μεγαλύτερη τιμή μέγιστης συνοχής αλλά και αυξημένη απαίτηση νερού. Το μίγμα S2 εμφάνισε ακόμα μεγαλύτερη μέγιστη συνοχή, γεγονός που συνάδει με το μεγαλύτερο ποσοστό αργιλικών (κολλοειδών) σωματιδίων. Εντούτοις η μορφή της καμπύλης που δίνει την εξάρτηση από το νερό, στην περιοχή του μέγιστου, είναι πιο απότομη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα κατά την ξήρανση καθώς τοπικές διαφοροποιήσεις στα επίπεδα υγρασίας θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη σχετικά μεγάλων διαφορών τάσεων στο σώμα της τάξης των 100kPa. Η απαίτηση νερού για μέγιστη συνοχή είναι 17.9%, η υψηλότερη τιμή από όλες τις περιπτώσεις. Στο μίγμα S3, η προσθήκη πιο χονδρόκοκκου χαλαζία είχε σαν συνέπεια λίγο μειωμένες τιμές συνοχής συγκριτικά με το S1, αλλά παράλληλα μικρότερη απαίτηση σε νερό. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη μικρότερη ειδική επιφάνεια του χονδρόκοκκου χαλαζία. Στο μίγμα S4 οι τιμές συνοχής δεν παρουσιάζονται αυξημένες συγκριτικά με το S1, παρά την παρουσία του συνδέτη CMC. Σε αντίθεση, το S5 εμφανίζει το δεύτερο μεγαλύτερο μέγιστο από όλα τα μίγματα και για χαμηλό ποσοστό νερού (~14%). Παράλληλα οι τιμές συνοχής παραμένουν σχετικά υψηλές για μεγάλο εύρος διακύμανσης στην περιεκτικότητα νερού. Η αυξημένη «περιοχή εργασιμότητας» είναι ένα χαρακτηριστικό ευνοϊκό για βιομηχανική εφαρμογή καθώς διακυμάνσεις στο ποσοστό νερού δε θα επηρεάσουν έντονα την ποιότητα της πλαστικής μάζας.

Εξάρτηση Πίεσης συναρτήσει Ποσοστού Νερού

Στην Εικόνα 2 φαίνεται η μεταβολή της «εξάρτησης πίεσης» (Pressure Dependence) από το ποσοστό νερού για τα μίγματα. Η εξώθηση πραγματοποιείται συνήθως με περιεκτικότητα νερού η οποία εξασφαλίζει μικρή εξάρτηση πίεσης (τυπικά $< 20 \text{ (kPa/kPa)} \cdot 100$) και για τιμές κοντά στο σημείο καμπής της καμπύλης πριν φτάσει το πλατό. Οι μικρές τιμές εξάρτησης πίεσης είναι επιθυμητές καθώς σε αυτή την περίπτωση θα καταναλωθεί μικρότερη ενέργεια κατά την εξώθηση και μπορεί να επιτευχθεί πιο πυκνή διευθέτηση σωματιδίων (closer packing). Αυξανόμενου του ποσοστού νερού η εξάρτηση πίεσης προσεγγίζει μηδενικά επίπεδα, το σύστημα περνάει στην υδαρή κατάσταση και δεν υπάρχει πλέον εξάρτηση από την περιεκτικότητα νερού (πλατό).



Εικόνα 2. Εξάρτηση της ΕΠ από το ποσοστό νερού. Καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζει το μίγμα αναφοράς W και αυτό με τον χονδρόκοκκο χαλαζία, S3, και Na-PAA, S5.

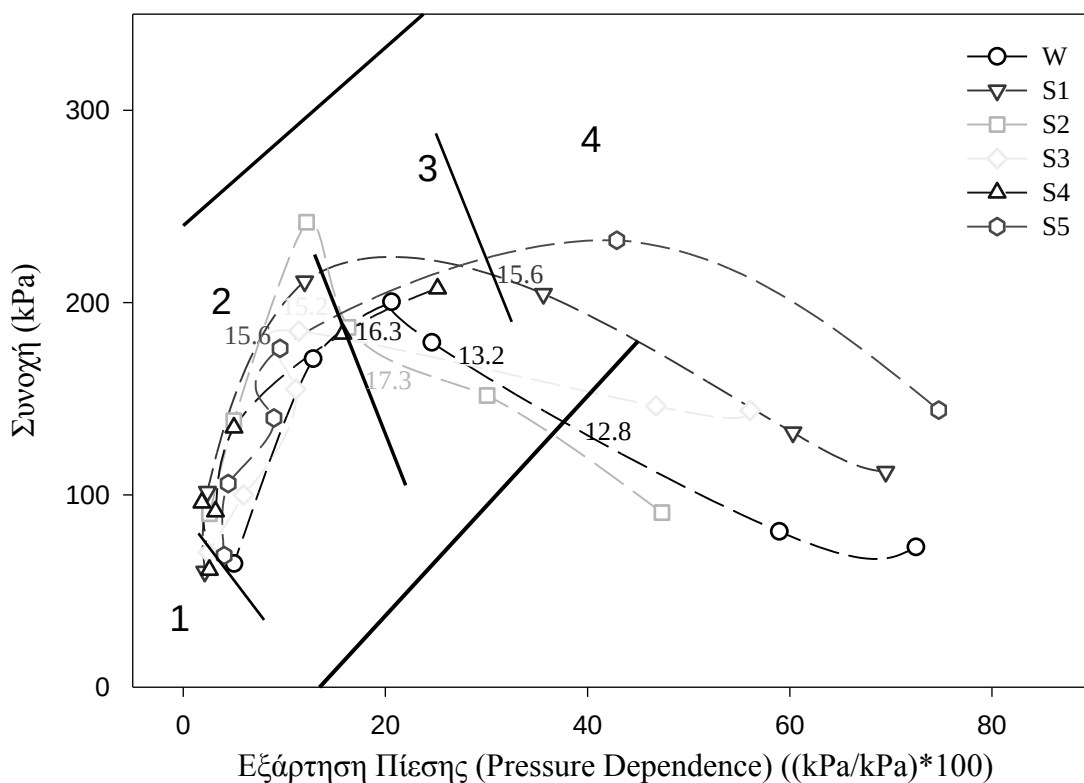
Όπως παρατηρούμε, τη μικρότερη απαίτηση σε νερό για χαμηλές τιμές εξάρτησης πίεσης έχει το μίγμα αναφοράς W. Το S3 και S5 ακολουθούν με τιμές 15.3% και 15.7% αντίστοιχα, για εξάρτηση πίεσης στην περιοχή του πλατό και κοντά στο $10(KPa/kPa)*100$. Το S1 και S4 ακολουθούν κατά αύξουσα απαίτηση σε νερό ενώ το S2 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες ανάγκες.

Συνοχή συναρτήσει Εξάρτησης Πίεσης και εκτίμηση συμπεριφοράς κατά την εξώθηση

Με παράθεση των τιμών συνοχής και εξάρτησης πίεσης σε κοινό διάγραμμα μπορεί να οριοθετηθούν 4 περιοχές οι οποίες καθορίζουν τη δυνατότητα για εξώθηση με κοχλία [Nowak, 1995]. Οι κατάλληλες περιοχές οριοθετούνται στην Εικόνα 3 ως 2 και 3. Πλαστικές μάζες με τιμές εντός της περιοχής 2 μπορούν να εξωθηθούν ενώ για την περιοχή 3 δύναται να έχουμε ικανοποιητική εξώθηση αλλά αυτό είναι συνάρτηση της τροφοδοσίας στον εξωθητή.

Πλαστικές μάζες με ποσοστό νερού που να εξασφαλίζει τιμές συνοχής κοντά στη μέγιστη τιμή μορφοποιήθηκαν με εμβολικό εξωθητή και παρήχθησαν κυλινδρικά δοκίμια. Για κάθε μίγμα, τρεις συνθέσεις παρήχθησαν με διαφορετικό ποσοστό νερού και η ποιότητα της εξώθησης αξιολογήθηκε οπτικά. Το δοκίμιο κρίθηκε ικανοποιητικό όταν δεν είχε εμφανείς ρωγμές και δεν παραμορφωνόταν κάτω από την επίδραση του βάρους του. Το ποσοστό νερού για τις καλύτερες συνθέσεις σημειώνεται στο διάγραμμα. Τα σημεία έχουν τοποθετηθεί προσεγγιστικά πάνω στην

καμπύλη μεταξύ των πειραματικών σημείων για τα οποία γνωρίζουμε το ποσοστό υγρασίας και τις τιμές συνοχής και εξάρτησης από την πίεση. Παρατηρούμε ότι τα μίγματα που μορφοποιήθηκαν ικανοποιητικά εν γένει βρίσκονται εντός της προβλεπόμενης περιοχής παρά τη διαφορά στο τρόπο εξώθησης. Το μίγμα αναφοράς είχε τη μικρότερη απαίτηση σε νερό (12.8% και 13.2%) ενώ τα S3 και S5 μορφοποιήθηκαν από 15.2% έως 15.6%. Το S4 μορφοποιήθηκε καλύτερα με 16.3% νερό ενώ το S2 εμφάνισε τη μεγαλύτερη απαίτηση σε νερό, 17.3%.



Εικόνα 3. Μεταβολή της συνοχής συναρτήσει της εξάρτησης πίεσης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για βέλτιστη μορφοποίηση με τις περιοχές καταλληλότητας 2 και 3, υπάρχει ικανοποιητική αντιστοιχία παρά τη διαφορά στον τρόπο μορφοποίησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα συνοψίζονται ως ακολούθως:

1. Η τεχνική HPASC, εμφανίζει συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των καθιερωμένων μεθόδων εκτίμησης της πλαστικότητας. Επιτρέπει με αναλυτικό και συστηματικό τρόπο τη μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς της πλαστικής μάζας και τα αποτελέσματα μπορούν να συσχετιστούν με την ικανότητα εξώθησης
2. Η προσθήκη 30%κβ ΣΑ, υποκαθιστώντας το αργιλούχο μίγμα, αυξάνει τη μέγιστη συνοχή του μίγματος αλλά δημιουργεί αυξημένη απαίτηση σε νερό

3. Με χρησιμοποίηση πιο χονδρόκοκκου χαλαζία ή προσθήκη Na-PAA είναι δυνατό να μειώσουμε το απαιτούμενο νερό για βέλτιστη μορφοποίηση χωρίς ουσιαστικό συμβιβασμό στα επίπεδα συνοχής του μίγματος. Προσθήκη CMC αύξησε την απαίτηση σε νερό.
4. Αύξηση του ποσοστού των αργιλικών ορυκτών οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης συνοχής του μίγματος αλλά και σημαντική αύξηση στο απαιτούμενο νερό για επίτευξη αυτής. Επιπρόσθετα, η μορφή της καμπύλης συνοχής συναρτήσει του νερού, στην περιοχή του μέγιστου, είναι πιο απότομη και κατά συνέπεια η ξήρανση είναι πιο επίφοβη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή έχει την οικονομική στήριξη της ΓΤΕΤ μέσω του ΕΠΑΝ 12252/19-11-02. Ο Ι.Π. ευχαριστεί το ΙΚΥ για την υποτροφία που του παρέχεται.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Agrawal A., Sahu, K. K., Pandey B. D., 2004. Solid waste management in non-ferrous industries in India, Resources, Conservation and Recycling, 42, 99–120.
2. Carty W. M. and Lee C., 1996. The characterization of plasticity, Science of Whitewares (Proc. Sci. Whitewares Conf.), Eds. V. Henkes, G. Onoda and W. Carty, 89-101.
3. Carty W. M., Rossington K. R. and Schuckers D. S., 1998. Plasticity Revisited, Science of Whitewares II, (Proc. Sci. Whitewares II Conf.), Eds. W. M. Carty and C. S. Sinton, 225-36.
4. Hind A. R., Bhargava S. K., Stephen C. Grocott, 1999. The surface chemistry of Bayer process solids: a review, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 146, 359–74.
5. Lee C., 1995. The characterization of plasticity in clay-based systems, M.S. Thesis, Alfred University, Alfred, NY.
6. Nowak P.A., 1995. Correlation of Extrusion Behavior with High Pressure Annular Shear Rheometry, M.S. Thesis, Alfred University, Alfred, NY.

<http://www.redmud.org>

ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Κ. Κ. Σίδερης, Κ. Γκυζάς, Ε. Διγάλα, Π. Κατσάνης και Β. Στρατηγόπουλος.
Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Βασ. Σοφίας 12, 67 100, Ξάνθη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία γίνεται διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης βιομηχανικών παραπροϊόντων στην παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με σκοπό την αύξηση της ποσότητας των λεπτών υλικών του τελευταίου. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν η φαρίνα ηλεκτροφίλτρων, η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας και η κατεργασμένη τέφρα Πτολεμαΐδας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας, τα συγκεκριμένα βιομηχανικά παραπροϊόντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος δεικνύοντας προσοχή κατά το σχεδιασμό του μείγματος. Η προσθήκη φαρίνας ηλεκτροφίλτρων μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του νωπού μείγματος, μειώνει την ικανότητα διείσδυσης μεταξύ των οπλισμών και οδηγεί σε μείωση των μηχανικών αντοχών. Από την άλλη μεριά οι ιπτάμενες τέφρες απαιτούν αυξημένη ποσότητα τσιμέντου και υπερδιπλασιασμό της δοσολογίας του υπερρευστοποιητή. Τα ΑΣΣ εμφανίζουν ικανοποιητικές -αν και σε κάποιες περιπτώσεις οριακές- ρεολογικές ιδιότητες ενώ οι μηχανικές τους αντοχές αυξάνονται σε όλες τις ηλικίες. Το βάθος ενανθράκωσης παρουσίασε μείωση σε όλα τα μείγματα που παρασκευάστηκαν με βιομηχανικά παραπροϊόντα.

Λέξεις κλειδιά: αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, φαρίνα ηλεκτροφίλτρων, ιπτάμενη τέφρα

SELF COMPACTING CONCRETE PRODUCED WITH INDUSTRIAL BY-PRODUCTS

K.K. Sideris, K. Gyzas, E. Dihala, P. Katsanis and V. Stratigopoulos

*Lab. of Building Materials, Department of Civil Engineers, DUTH, 12 Vas. Sophias str, 671 00
Xanthi*

ABSTRACT: Use of industrial by-products for the production of self-compacting concrete is experimentally investigated in this paper. According to the results of this research, it is possible to produce self-compacting concrete by using cement kiln dust or lignite fly ash. The so produced mixtures performed lower rheological properties (passing ability, segregation resistance) and they required higher amounts of cement and superplasticizer. The compressive strength of the cement kiln dust mixture was significantly reduced; on the other hand the strength of the fly ash mixtures was increased. The carbonation depth of all mixtures produced with industrial by-products was reduced.

Keywords: self-compacting concrete, cement kiln dust, lignite fly ash.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο “αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα” (ΑΣΣ) ονομάζουμε το σκυρόδεμα εκείνο που σε νωπή κατάσταση έχει την ικανότητα να τοποθετείται στους ξυλοτύπους και να διέρχεται μέσα από τον οπλισμό μόνο με την δύναμη της βαρύτητας, χωρίς τη χρήση δονητών μάζας ή άλλης εξωτερικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την ομοιογένειά του (Okamura and Ouchi, 1999). Κατ’ αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η διαδικασία της διάστρωσης επί τόπου του έργου, αφού το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα ρέει εύκολα μέσα στους τύπους. Επιπλέον με τη χρήση του ΑΣΣ μειώνεται η ακουστική ρύπανση λόγω απουσίας δονητών μάζας και διευκολύνεται η επικοινωνία μεταξύ του τεχνικού προσωπικού, μειώνοντας τον κίνδυνο εργατικών ατυχημάτων. Έχει επίσης αποδειχθεί (Σίδερης, 2003, Persson, 2001) ότι η ανθεκτικότητα του ΑΣΣ είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του συμβατικού σκυροδέματος, λόγω της καλύτερης και πληρέστερης συμπίκνωσης που επιτυγχάνεται. Η χρήση λοιπόν του ΑΣΣ έχει ως αποτέλεσμα την παρασκευή ανθεκτικότερων κατασκευών, αφού η τελική ποιότητα του σκυροδετημένου δομικού στοιχείου δεν εξαρτάται πλέον από το δίπτυχο δονητής μάζας-ικανότητα και προθυμία χειριστού.

Η τεχνολογία του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος πρωτοεμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 στην Ιαπωνία από τον καθηγητή Okamura, ενώ τη δεκαετία του 1990 άρχισε η παρασκευή του και σε ευρωπαϊκές χώρες, κυρίως στη Σκανδιναβία και στην Ολλανδία. Οι Ιάπωνες είναι οι πρώτοι που έχουν θεσπίσει εθνικούς κανονισμούς για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (Japan Society of Civil Engineers, 1999), ενώ αργότερα σχετικοί κανονισμοί αναπτύχθηκαν και από άλλες χώρες όπως η Γερμανία, η Γαλλία και ορισμένες σκανδιναβικές χώρες. Με τη συγκεκριμένη τεχνολογία έχει ασχοληθεί η RILEM (Rilem, Report 23, 1999), ενώ το Φεβρουάριο του 2002 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Σκυροδέματος (EFNARC) προχώρησε στη σύνταξη σχετικών οδηγιών (EFNARC, 2002). Πρόσφατα (05/2005) παρουσιάστηκε και το σχέδιο του Ευρωπαϊκού Κανονισμού για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα.

Βασικό στοιχείο για τη βελτιστοποίηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του νωπού αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος είναι η περιεκτικότητά του σε πολύ λεπτά υλικά, τα οποία ορίζονται ως το άθροισμα της μάζας του τσιμέντου, της μάζας των ποζολανικών προσθέτων (πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων) και της παιπάλης που προέρχεται από την άμμο (ασβεστολιθικό ή πυριτικό φίλλερ). Με τον όρο φίλλερ χαρακτηρίζονται τα διερχόμενα από το κόσκινο των 0,075 mm (ή των 0,125 mm) στην Ευρώπη, ενώ στην Ιαπωνία για τον αντίστοιχο προσδιορισμό χρησιμοποιείται το κόσκινο των 0,090 mm.

Σύμφωνα με τον κανονισμό της EFNARC, η ποσότητα του λεπτόκοκκου υλικού πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 400-600 κιλών στο κυβικό μέτρο, προκειμένου το νωπό σκυρόδεμα να έχει τις απαιτούμενες ιδιότητες. Όταν παρά την προσθήκη των πολύ λεπτών υλικών εξακολουθεί να υπάρχει κίνδυνος απόμειξης, προστίθεται και μία μικρή ποσότητα προσθέτου ρυθμιστικού του ιξώδους (viscosity modifying agent, VMA) προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη αντίσταση του μείγματος σε απόμειξη. Η ποσότητα του απαιτούμενου προσθέτου για τη ρύθμιση του ιξώδους αυξάνεται, όσο μειώνεται η ποσότητα των λεπτόκοκκων υλικών. Μάλιστα είναι δυνατή η παρασκευή ΑΣΣ αποκλειστικά με προσθήκη VMA, χωρίς ανάλογη αύξηση των λεπτόκοκκων υλικών, τα μείγματα αυτά όμως χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη ανθεκτικότητα στο χρόνο συγκρινόμενα με τα υπόλοιπα ΑΣΣ (Σίδερης 1999, Zhu and Bartos 2003).

Πίνακας 1: Ενδεικτικές αναλογίες υλικών αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (EFNARC 2002).

Λόγος νερού/πούδρα: 0.80 – 1.10 κατ'όγκον
Συνολική ποσότητα λεπτόκοκκου υλικού: 160-240 lt (400-600 Kg) ανά κυβικό μέτρο.
Περιεκτικότητα χονδρόκοκκων αδρανών: 28-35% του συνολικού όγκου του μείγματος
Ποσότητα νερού: Δεν υπερβαίνει τα 200 lt/m ³ (τηρούνται οι περιορισμοί του EN-206)
Περιεκτικότητα άμμου: Ισορροπεί τον όγκο των υπολοίπων συστατικών.

Γενικά ο σχεδιασμός των ΑΣΣ βασίζεται στο τρίπτυχο: λεπτόκοκκα υλικά-ισχυρός υπερρευστοποιητής-ρυθμιστής ιξώδους, σε συνδυασμό με υψηλή δόση τσιμέντου και χαμηλή ποσότητα νερού. Οι βασικές αρχές που διέπουν το σχεδιασμό ενός ΑΣΣ σύμφωνα με τις συστάσεις της EFNARC παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Ως λεπτόκοκκα υλικά είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διάφορα βιομηχανικά παραπροϊόντα. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η δυνατότητα χρήσης ελληνικών βιομηχανικών παραπροϊόντων στην παρασκευή ΑΣΣ. Τα βιομηχανικά παραπροϊόντα που εξετάστηκαν ήταν η κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (ΚΤΠ), η ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (ΙΤΠ), και η φαρίνα ηλεκτροφίλων (ΦΗΦ).

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

Η χημική σύσταση του τσιμέντου και των υπολοίπων υλικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Οι αναλογίες μείξεως των μειγμάτων ΑΣΣ παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 2: Χημική ανάλυση ιπταμένων τεφρών και φαρίνας ηλεκτροφίλων.

Οξείδια (%)	ΦΗΦ	ΙΤΠ	ΚΤΠ
SiO ₂	13,68	27,10	45.15
Ενεργό SiO ₂	--	-	22.58
Al ₂ O ₃	4,36	11,22	17.50
Fe ₂ O ₃	2,30	4,14	8.18
CaO	42,59	38,43	14.87
Ενεργό CaO	--	12,34	1.64
MgO	1,23	3,46	3.44
SO ₃	0,10	6,31	4.72
Na ₂ O	0,28	0,81	--
K ₂ O	0,79	0,54	--
Διερχόμενα από το κόσκινο 45 μm	---	16	25.5

Από τον Πίνακα 3 φαίνεται κατ' αρχήν ότι είναι δυνατή η παρασκευή μειγμάτων ΑΣΣ με χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων. Με χρήση της κατάλληλης μεθοδολογίας σχεδιασμού (Σίδερης, 2005) προκύπτουν οι βέλτιστες αναλογίες μείξεως για κάθε μείγμα.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η απαίτηση του ΑΣΣ για μεγαλύτερη ποσότητα λεπτόκοκκων υλικών μπορεί να καλυφθεί με χρήση ασβεστολιθικού φύλλερ (μείγμα 1). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ποσότητα φαρίνας ηλεκτροφίλων (μείγμα 11), η οποία όμως οδηγεί σε λιγότερο εργάσιμο μείγμα., εάν παραμένουν σταθερές οι ποσότητες του νερού και του υπερρευστοποιητή. Στην περίπτωση χρήσης των ιπταμένων τεφρών (μείγματα 14 και 15) τα μείγματα που προκύπτουν έχουν αυξημένη απαίτηση σε περιεκτικότητα τσιμέντου (για να καλυφθεί η απαιτούμενη ποσότητα λεπτών υλικών) καθώς και σε υπερρευστοποιητή. Λόγω του μικρότερου τελικού υδατοτσιμεντοσυντελεστή, τα μείγματα αυτά παρουσιάζουν ιδιότητες αυτοσυμπύκνωσης κατώτερες του μείγματος 1. Ας επισημανθεί η μειωμένη αντίσταση

διαχωρισμού των υλικών (segregation resistance) που παρουσιάζουν αυτά: οι τιμές που μετρήθηκαν στη συσκευή V-funnel είναι σημαντικά αυξημένες σε σχέση με αυτές των μειγμάτων 1 και 11 και βρίσκονται στο άνω όριο των αποδεκτών αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3: Αναλογίες μείξεως σκυροδεμάτων και μετρήσεις ρεολογικών ιδιοτήτων.

Αναλογίες μείξεως (Kg/m ³)	Μείγμα 1	Μείγμα 11	Μείγμα 14	Μείγμα 15
CEM ΙΙΑ/Μ 42.5N	337	353	373	373
Φίλλερ	240	---	--	--
Ιπτάμενη Τέφρα	--	--	74,5 (ΚΤΠ)	74,5 (ΙΤΠ)
ΦΗΦ	--	204	--	---
Άμμος (ασβεστολιθική)	782	805	1014	1014
Γαρμπίλι	800	800	800	800
Νερό (συνολικό)	220	220	212	214
Υπερ/της (%)	1,23	1,25	2,8	3,1
Εξάπλωση (cm)	71	60	70	65
L- Box (H ₂ /H ₁)	0.96	0.8	0.86	0.92
V-funnel (sec)	4.35	5	18	10

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε όλα τα μείγματα μετρήθηκαν η θλιπτική αντοχή σε διάφορες ηλικίες. Η μέτρηση της θλιπτικής αντοχής πραγματοποιήθηκε σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος 100x100x100 mm (για τις ηλικίες των 2, 28 και 60 ημερών) και 150x150x150 mm για την ηλικία των 28 ημερών, ενώ η τιμή κάθε ηλικίας αποτελεί το μέσο όρο τριών μετρήσεων. Η εφελκυστική αντοχή διαρρήξεως και το στατικό μέτρο ελαστικότητας μετρήθηκαν στην ηλικία των 28 ημερών σε κυλινδρικά δοκίμια 150x300 mm. Η τιμή κάθε ηλικίας αποτελεί το μέσο όρο δύο μετρήσεων. Οι μετρήσεις των μηχανικών χαρακτηριστικών παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Μετρήσεις μηχανικών ιδιοτήτων μειγμάτων ΑΣΣ.

	Θλιπτική αντοχή (MPa) κύβων 100x100x100			f _{c28} (MPa)	E (GPa)	f _{ct} (MPa)
	2 ημ.	28 ημ	60 ημ			
Μείγμα 1	16.1	31.7	40.7	40.7	23.0	2.35
Μείγμα 11	11.3	15.0	23.5	28.3	19.2	2.22
Μείγμα 14	31.8	34.9	45.1	60.0	19.0	2.11
Μείγμα 15	23.9	34.3	49.7	53.0	18.6	4.41

Παράλληλα παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 60x100 mm. Τα δοκίμια αυτά, αφού συντηρήθηκαν όπως ορίζει ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97) για διαφορετικό χρόνο, τοποθετήθηκαν σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης, με συγκέντρωση CO₂ = 10%, σχετική υγρασία 70% και θερμοκρασία 20±2 °C. Μετά από παραμονή έξι εβδομάδων στον ανωτέρω θάλαμο τα δοκίμια θραύστηκαν και ψεκάστηκαν με διάλυμα φαινόλοφθαλείνης, προκειμένου να μετρηθεί το βάθος ενανθράκωσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στον Πίνακα 5.

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4 η χρήση φαρίνας ηλεκτροφίλτρων οδηγεί σε σημαντική μείωση των αντοχών του σκυροδέματος σε κάθε ηλικία. Είναι αξιοσημείωτο ότι παρά την αυξημένη ποσότητα του τσιμέντου στο μείγμα 11 και το χαμηλότερο υδατοτσιμεντοσυντελεστή του τελευταίου σε σχέση με το μείγμα 1, η θλιπτική αντοχή των 28 ημερών παρουσιάζει μείωση

κατά 33%. Αποτέλεσμα αυτού είναι η σημαντική διαφορά που εμφανίζεται στην κατηγορία αντοχής: το μείγμα 1 χαρακτηρίζεται ως C30/37 ενώ το μείγμα 11 ως C16/20. Το υψηλό ποσοστό θεικών της συγκεκριμένης φαρίνας πιστεύεται ότι είναι υπεύθυνο για το φαινόμενο αυτό το οποίο χρήζει περαιτέρω μελέτης. Μικρή πτώση στη θλιπτική αντοχή των 90 ημερών παρατηρήθηκε και σε δοκίμια με χαμηλό ποσοστό ΦΗΦ στην εργασία των Batis et al, 1996.

Αντίθετα με το μείγμα 11, τα μείγματα στην παρασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα (μείγματα 14, 15) παρουσιάζουν αυξημένες μηχανικές αντοχές σε όλες τις ηλικίες. Για το φαινόμενο αυτό ευθύνεται η αυξημένη ποσότητα τσιμέντου σε συνδυασμό με την ποζολανική ιδιότητα που χαρακτηρίζει τις ιπτάμενες τέφρες. Μεταξύ των δύο ειδών τέφρας που εξετάστηκαν, το μείγμα με την Κ.Τ.Π. παρουσίασε υψηλότερες τιμές μηχανικών αντοχών, γεγονός που οφείλεται στην επεξεργασία της. Πάντως και τα δύο μείγματα χαρακτηρίζονται ως C35/45.

Πίνακας 5: Βάθος ενανθράκωσης δοκιμίων σκυροδέματος

Συντήρηση:	1 ημέρα	3 ημέρες	7 ημέρες
Βάθος ενανθράκωσης (mm)			
Μείγμα 1:	30	19	11
Μείγμα 11:	21	16	8
Μείγμα 14:	16	8	6
Μείγμα 15:	20	9	7

Στον πίνακα 5 παρουσιάζεται το βάθος ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων ανάλογα με το χρόνο συντήρησης. Από τον πίνακα αυτόν φαίνεται η μεγάλη σημασία της διάρκειας της υγρής συντήρησης στο βάθος ενανθράκωσης των δοκιμίων. Η υγρή συντήρηση 7 ημερών περιόρισε το βάθος ενανθράκωσης στο 70% της αντίστοιχης τιμής που μετρήθηκε στα μείγματα τα οποία είχαν υποστεί συντήρηση 1 ημέρας. Η φαρίνα ηλεκτροφίλων είχε στην περίπτωση αυτή ευνοϊκά αποτελέσματα, αφού το βάθος ενανθράκωσης των δοκιμίων του μείγματος 11 μειώθηκε σε σχέση με το μείγμα 1 (μείγμα αναφοράς) για όλες τις ηλικίες συντήρησης.

Ακόμη μεγαλύτερη ήταν η μείωση του βάθους ενανθράκωσης των μειγμάτων στην παρασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκε κατεργασμένη και ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας. Η μείωση στην περίπτωση αυτή έφτασε και το 50% της τιμής που μετρήθηκε στα δοκίμια του μείγματος αναφοράς και ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακή στα δοκίμια με συντήρηση 1 ημέρας. Η μεγαλύτερη δοσολογία τσιμέντου σε συνδυασμό με την ποσότητα της τέφρας οδήγησαν στο σχηματισμό επιπλέον πρωτογενών και δευτερογενών ενύδρων, η παρουσία των οποίων είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του ενεργού πορώδους και του βάθους ενανθράκωσης (Sideris et al, 2005). Μεταξύ των δύο τεφρών η κατεργασμένη τέφρα Πτολεμαΐδας αποδείχθηκε πιο αποτελεσματική όσον αφορά τη μείωση του βάθους ενανθράκωσης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας η φαρίνα ηλεκτροφίλων καθώς και η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας μπορούν υπό προϋποθέσεις να χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Τα μείγματα αυτά όμως απαιτούν μεγαλύτερη δοσολογία τσιμέντου, μεγαλύτερη ποσότητα υπερρευστοποιητή και παρουσιάζουν ελαφρά κατώτερες ιδιότητες αυτοσυμπύκνωσης, ιδιαίτερα όσον αφορά την αντίσταση στο διαχωρισμό των υλικών των μειγμάτων στην παρασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα. Η χρήση της συγκεκριμένης φαρίνας ηλεκτροφίλων οδήγησε σε σημαντική μείωση των αντοχών των μειγμάτων σε πρώιμες και μεθύτερες ηλικίες. Αντίθετα, στην περίπτωση των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν με ιπτάμενες τέφρες, η αυξημένη δόση του τσιμέντου που απαιτήθηκε σε συνδυασμό με τις ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες των τεφρών οδήγησε σε αυξημένες

αντοχές. Το βάθος ενανθράκωσης όλων των αυτοσυμπυκνούμενων σκυροδεμάτων στην παρασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκαν βιομηχανικά παραπροϊόντα μειώθηκε σε σχέση με το μείγμα αναφοράς.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Batis G., Katsiamboulas A., Meletiou C.A. and Chaniotakis E.: "Durability of reinforced concrete made with composite cement kiln dust", in *Proceedings of the International conference Concrete in the Service of Mankind*, Vol. "Concrete for Environment Enhancement and Protection", Dundee, 1996, pp. 67-72.

EFNARC, 2002. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete.

Japan Society of Civil Engineers, 1999. Recommendation for Self Compacting Concrete, Edited by T. Uomoto and K. Ozawa, *JSCE Concrete Engineering Series 31*.

Okamura H., Ouchi M.: "Self compacting concrete. Development, present use and future", in *Proceedings of the First International Rilem Symposium on Self Compacting Concrete*, Stockholm. Sweden, September, pp. 3-14.

Persson B.: "Assesment of the chloride migration coefficient, internal frost resistance, salt frost scaling and sulphate resistance of self-compacting concrete", *Report NTVBM-3100*, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Lund, Sweden, 2001.

RILEM Report 23: *State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174 SCC "Self Compacting Concrete"*. RILEM Publications, 2001.

Sideris K.K., Savva A. Papayianni I. 2005. Sulfate Resistance and Carbonation of plain and blended cements, *Cement and Concrete Composites*, (in press).

Zhu W, Bartos P. J. M. 2003. Permeation properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Composites*, (in press).

Σίδερης Κ.Κ., Κυριτσάς Σ., Χανιωτάκης Ε. 2003. Μηχανικά χαρακτηριστικά και Ανθεκτικότητα Αυτοσυμπυκνούμενων Σκυροδεμάτων παρασκευασθέντων με Ελληνικά Ποζολανικά Υλικά, *Πρακτικά 14^{ου} Ελληνικού Συνεδρίου Σκυροδέματος*, Κως, 15-17 Οκτωβρίου 2003, Τόμος Β, σελ. 187-193.

Σίδερης Κ.Κ. 2005. Βελτιωμένη μέθοδος σχεδιασμού και ποιοτικού ελέγχου μειγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, *Εσωτερική ανακοίνωση Εργαστηρίου Δομικών Υλικών Πολυτεχνικής Σχολής ΔΠΘ*, Ξάνθη.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΣΚΩΡΙΑΣ ΚΑΔΟΥ (LADLE FURNACE SLAG) ΣΑΝ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΗ ΚΟΝΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η σκωρία κάδου είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας χάλυβα που προκύπτει κατά το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας του ακατέργαστου υλικού και παρουσιάζει τσιμεντοειδείς ιδιότητες, κυρίως λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε CaO . Για τη διερεύνηση της δυνατότητας να χρησιμοποιηθεί μαζί με το τσιμέντο σαν συμπληρωματική κονία για την παραγωγή σκυροδέματος έγινε μια σειρά από συνθέσεις κονιαμάτων με αντικατάσταση του τσιμέντου από σκωρία κάδου σε ποσοστό 20% κ.β. με βασική παράμετρο την λεπτότητα της σκωρίας. Μετά από κοσκίνισμα ελέγχθηκαν τέσσερις συνθέσεις με σκωρία μέγιστου κόκκου 105μm, 75μm, 60μm και 45μm και δύο συνθέσεις με σκωρία αλεσμένη ώστε να έχει 31% και 21% συγκρατούμενο στο κόσκινο των 45μm, οι οποίες συγκρίθηκαν με τη σύνθεση αναφοράς με κονία 100% τσιμέντο. Οι συνθέσεις με σκωρία κάδου έφτασαν μέχρι το 94% της αντοχής του κονιάματος μόνο με τσιμέντο, γεγονός που καταδεικνύει τη δυνατότητα χρησιμοποίησής της σαν συμπληρωματική κονία για την παραγωγή σκυροδέματος.

Λέξεις κλειδιά: σκωρία κάδου, σκυρόδεμα, συμπληρωματικές κονίες.

EVALUATION OF LADLE FURNACE SLAG AS A SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIAL

I. Papayianni, E. Anastasiou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.

ABSTRACT: Ladle furnace slag is a by-product of the steel industry, deriving from the second stage of the production process, which shows some cementitious properties, mainly due to its high CaO content. A series of test mortars with 20% by weight of the cement substituted with ladle furnace slag was produced in the laboratory, in order to investigate its potential as a supplementary cementing material, the varying parameter being the fineness of the slag. Thus, following some screening of the material, four mortars were produced with slag of maximum grain size 105 μm , 75 μm , 60 μm and 45 μm and also two more test mortars were produced with ground slag retaining 31% and 21% at the 45 μm sieve, all of which were compared to a test mortar with 100% cement as a binder. The test mortars developed compressive strength as high as 94% of the 100%-cement mortar, which shows that ladle furnace slag can be used as a supplementary cementing material.

Keywords: ladle furnace slag, concrete, supplementary cementing materials

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με βάση την παγκόσμια ανάγκη για περιορισμό της κατανάλωσης πρώτων υλών αλλά και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στην κατασκευαστική βιομηχανία [1] κρίνεται αναγκαίο για κάθε χώρα να εκμεταλλευθεί στο έπακρο όλα τα διαθέσιμα χρήσιμα παραπροϊόντα των βιομηχανιών της. Στην περίπτωση της βιομηχανίας σκυροδέματος ένα παραπροϊόν λεπτού διαμερισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν φίλλερ ή σαν λεπτόκοκκο αδρανές [2], αλλά μεγαλύτερο όφελος προκύπτει όταν αυτό είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί σαν συνδετική κονία [3], δηλαδή να αντικαταστήσει το τσιμέντο σε κάποιο ποσοστό. Έτσι, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό Σκυροδέματος EN-206 [4] τα πρόσθετα χωρίζονται σε τύπου Ι (πρακτικά αδρανή) και τύπου ΙΙ (με ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες).

Οι σκωρίες χαλυβουργίας είναι παραπροϊόντα ευρέως γνωστά στην κατασκευαστική βιομηχανία, τα περισσότερα από τα οποία έχουν εισαχθεί επιτυχώς στην παραγωγή σκυροδέματος είτε ως αδρανή είτε ως κονίες [5]. Σε αυτό το πλαίσιο έχει αναπτυχθεί και έχει υιοθετηθεί σε άλλες χώρες η χρήση της αλεσμένης σκωρίας υψικαμίνων (ground granulated blast-furnace slag – ggbs) σαν εναλλακτική κονία για το σκυρόδεμα [6], ένα παραπροϊόν που δεν απαντάται στην Ελλάδα. Αντίθετα, στην Ελλάδα παράγεται σκωρία από τήξη φωτοβολταϊκού τόξου (electric-arc furnace slag) η οποία βρίσκει εφαρμογές στην κατασκευαστική βιομηχανία ως αδρανές [7] και, στο δεύτερο στάδιο επεξεργασίας, η σκωρία κάδου (ladle furnace slag). Στην παρούσα εργασία γίνεται μια διερεύνηση για τη δυνατότητα χρησιμοποίησης της σκωρίας κάδου της ΣΙΔΕΝΟΡ σαν εναλλακτική κονία για την παραγωγή σκυροδέματος.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των βιομηχανικών παραπροϊόντων και ειδικότερα των σκωριών χαλυβουργίας είναι ότι οι φυσικοχημικές ιδιότητές τους διαφέρουν πάρα πολύ ανάλογα με τις πρώτες ύλες, τη διαδικασία παραγωγής και την τελική επεξεργασία. Έτσι τελικά, μπορούν να προκύψουν είτε προϊόντα προϊόντα χαμηλού κόστους για εφαρμογές χαμηλών απαιτήσεων [8], είτε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας που προσδίδουν βελτιωμένες ιδιότητες στο τελικό προϊόν [9]. Με βάση τη χημική σύσταση (Πίνακας 1) και την κοκκομετρία της συγκεκριμένης σκωρίας κάδου κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η ικανότητά της να αντικαταστήσει το τσιμέντο σε ένα ποσοστό 20% κ.β. και να αξιολογηθεί η επίπτωση που έχει στο ρυθμό ανάπτυξης της αντοχής και στην επίτευξη ικανοποιητικών μηχανικών αντοχών. Βασική παράμετρος των ελέγχων είναι ο έλεγχος της επιρροής της λεπτότητας του υλικού στην ανάπτυξη των τελικών αντοχών, καθώς και η προοπτική της επεξεργασίας του με άλεση ώστε να αυξηθεί η δραστηριότητά του. Πέρα από τη δυνατότητα χρήσης της σκωρίας κάδου σε αντικατάσταση του τσιμέντου, ελέγχεται και η ικανότητά της στην ανάπτυξη αντοχών μαζί με άσβεστο για την παραγωγή κονιαμάτων. Η παρούσα εργασία, δηλαδή, αποτελεί μια προκαταρκτική έρευνα που θα δώσει συμπεράσματα και κατευθυντήριες γραμμές για τις μελλοντικές δυνατότητες αξιοποίησης του υλικού, καθώς και μια πρώτη εκτίμηση για τη δυνατότητα περαιτέρω επεξεργασίας του υλικού ώστε να αποκτήσει βελτιωμένες ιδιότητες.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Η σκωρία κάδου που ελέγχθηκε προέρχεται από τη χαλυβουργία ΣΙΔΕΝΟΡ και διαχειρίζεται από την ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε. Προκύπτει από το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας κατά την παραγωγή του δομικού χάλυβα, όπου μετά την απομάκρυνσή της από το σημείο παραγωγής ψύχεται αρχικά με καταιονισμό νερού. Στη συνέχεια το υλικό υφίσταται διαχωρισμό για τυχόν υπολείμματα μετάλλου, τα οποία επιστρέφονται στην παραγωγική διαδικασία του χάλυβα και τελικά προκύπτει ένα υλικό με ποικίλη διαβάθμιση. Από αυτό το υλικό με κοσκίνιση επιλέγεται το κλάσμα που θα

χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή. Η χημική του ανάλυση καθώς και κάποιες φυσικοχημικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση σκωρίας κάδου

	Διαλυτά σε οξέα	Διαλυτά σε HCl 0.1 N
Na ₂ O	0,34	0,03
K ₂ O	0,04	0,01
CaO	54,1	52,7
MgO	5,55	5,12
FeO	1,72	1,25
Al ₂ O ₃	2,50	2,47
SiO ₂	32,5	26,4
Υδατοδιαλυτά άλατα (% κ.β.)	Cl ⁻ 0,03	NO ₃ ⁻ 0 SO ₄ ⁻ 0,21
Απώλεια Πύρωσης (950°C) (%)		3,19
Απώλεια Πύρωσης (550°C) (%)		2,62
Ειδικό βάρος (g/cm ³)		2,590

Χρήση σκωρίας κάδου με τσιμέντο

Για τη δραστηριότητα μιας κονιάς σημαντικό ρόλο παίζει η ειδική επιφάνεια των κόκκων, άρα και η λεπτότητα. Επομένως, για τη διεξαγωγή των ελέγχων δραστηριότητας με τσιμέντο η σκωρία αποφασίστηκε να ελεγχθεί σε τέσσερις διαβαθμίσεις μετά από κοσκίνιση: 0-105μm, 0-75μm, 0-60μm, 0-45μm. Ένας ακόμη παράγοντας της δραστηριότητας μιας κονιάς είναι η κατανομή των κόκκων, αλλά και η δυνατότητα αντίδρασης της διαθέσιμης ειδικής επιφάνειας. Για ελεγχθούν καλύτερα αυτοί οι παράγοντες, ένα δείγμα σκωρίας αλέστηκε και προέκυψαν δύο ακόμη κλάσματα, ένα με 31% συγκρατούμενο στο κόσκινο 45μm και ένα με 21% συγκρατούμενο στο κόσκινο 45μm. Με τα έξι αυτά κλάσματα έγιναν έξι εργαστηριακές συνθέσεις κονιαμάτων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, και για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε και μία σύνθεση κονιάματος με 100% τσιμέντο σαν κονία.

Όλες οι συνθέσεις έγιναν με σταθερή εργασιμότητα 16±0,5cm και μετρήθηκε η απαίτηση του νερού ώστε να επιτευχθεί η συγκεκριμένη τιμή εξάπλωσης (Πίνακας 2). Οι συνθέσεις περιγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 3. Από τις συνθέσεις αυτές προέκυψαν κυβικά δοκίμια 7x7x7 cm, τα οποία συντηρήθηκαν σε νερό κορεσμένο σε Ca(OH)₂ μέχρι τη στιγμή διεξαγωγής των ελέγχων. Τα δοκίμια ελέγχθηκαν ως προς την αντοχή σε θλίψη σε ηλικία 7 και 28 ημερών, ώστε να ελεγχθεί και ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής.

Πίνακας 2. Χρήση σκωρίας διαφορετικής λεπτότητας στις δοκιμαστικές συνθέσεις

Σύνθεση	M	AΣ-105	AΣ-75	AΣ-60	AΣ-45	AΣ-31%	AΣ-21%
Κλάσμα σκωρίας	-	0-105μm	0-75μm	0-60μm	0-45μm	31% συγκρ. στο κόσκινο 45μm	21% συγκρ. στο κόσκινο 45μm
Αντικατάσταση τσιμέντου κ.β.	0%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Εξάπλωση (cm)	16,5	16,5	16,0	16,5	16,5	16,0	16,5
Απαίτηση νερού(% της M)	-	105%	100%	96%	96%	96%	98%

Πίνακας 3. Περιγραφή συνθέσεων με τσιμέντο

	Πρότυπη σύνθεση	Συνθέσεις αντικατάστασης
Τσιμέντο CEM I42,5 (g)	1000	800
Σκωρία κάδου (g)	0	200
Πρότυπη άμμος (g)	2700	2700
Νερό (g)	484	484*
Ειδικό βάρος σύνθεσης (g/cm ³)	2,312	2,143
Λόγος νερού προς κονία (N/K)	0,484	0,484*

* έγινε προσαρμογή του νερού ώστε να έχουμε εργασιμότητα 16±0,5 cm

Χρήση σκωρίας κάδου με υδράσβεστο

Μια εναλλακτική εφαρμογή της σκωρίας κάδου είναι μαζί με υδράσβεστο για την παραγωγή κονιαμάτων. Η δυνατότητα ανάπτυξης ικανών αντοχών είναι μια σαφής ένδειξη της ποζολανικότητας του υλικού. Για το σκοπό αυτό έγιναν δύο δοκιμαστικές συνθέσεις με τα κλάσματα 0-75μm (L-ΑΣ-75) και 21% (L-ΑΣ-21%) συγκρατούμενο στο κόσκινο 45μm, της διαθέσιμης σκωρίας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4. Από τις συνθέσεις προέκυψαν πρισματικά δοκίμια 4x4x16cm και κυλινδρικά διαμέτρου 5cm και ύψους 10cm, όπου ελέγχθηκαν οι αντοχές σε κάμψη και θλίψη αντίστοιχα, καθώς και ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής.

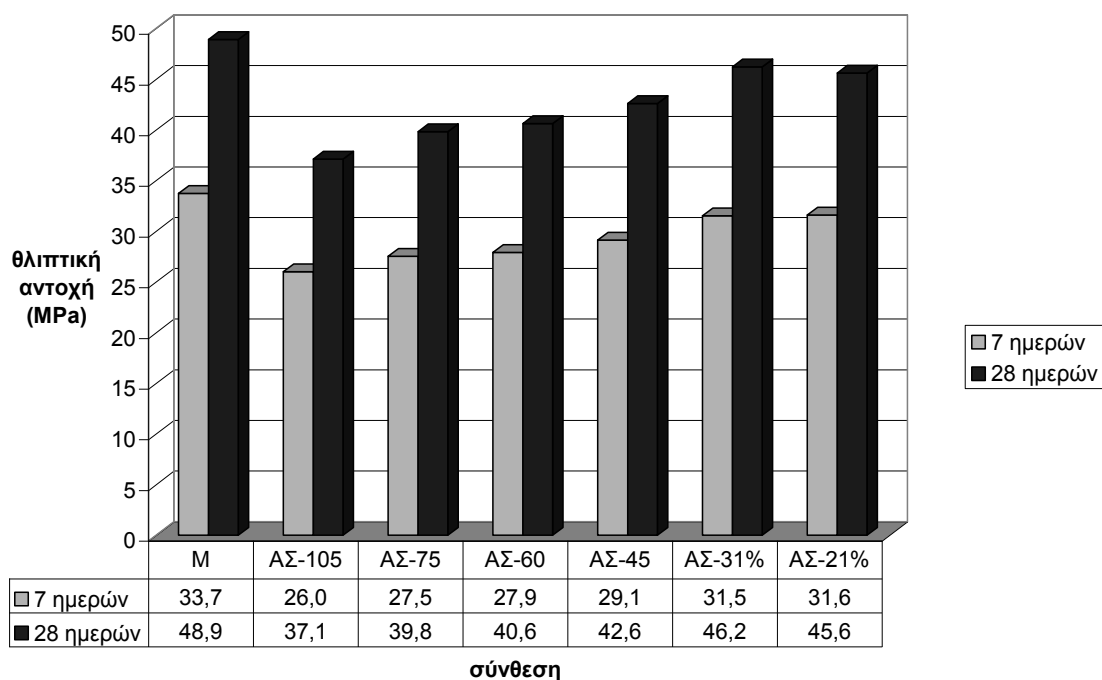
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Συνθέσεις σκωρίας με τσιμέντο

Από τα αποτελέσματα των ελέγχων αντοχών σε θλίψη (Εικόνα 1) φαίνεται ότι η λεπτότητα της σκωρίας κάδου επηρεάζει άμεσα την ανάπτυξη μηχανικών αντοχών και πιο συγκεκριμένα από θλιπτική αντοχή 28 ημερών 37,1 MPa για το κλάσμα 0-105μm φτάνουμε στα 42,6MPa για το κλάσμα των 0-45μm, δηλαδή όσο λεπτότερη η σκωρία τόσο μεγαλύτερη η προκύπτουσα αντοχή. Η άλεση προσδίδει ακόμα καλύτερες υδραυλικές ιδιότητες στο υλικό, γεγονός που αποδίδεται στη μεγαλύτερη ενεργή επιφάνεια των κόκκων μετά από την άλεση, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι τα δύο αλεσμένα δείγματα σκωρίας (31% και 21%) δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ως προς τις τελικές αντοχές.

Πίνακας 4. Περιγραφή συνθέσεων με υδράσβεστο

	L-ΑΣ
1 μέρος βάρους υδράσβεστος (g)	150
2,4 μέρη βάρους σκωρία κάδου (g)	360
9 μέρη πρότυπη άμμο (g)	1350
Απαιτούμενο νερό για εξάπλωση 11±0,5cm (g)	240
Ειδικό βάρος σύνθεσης (g/cm ³)	2,172
Λόγος νερού προς κονία (N/K)	0,47



Εικόνα 1. Ανάπτυξη αντοχών κονιαμάτων με σκωρία κάδου και τσιμέντο

Από τον Πίνακα 2 φαίνεται ότι η προσθήκη της σκωρίας κάδου στο μίγμα δεν αυξάνει την απαίτηση νερού, αντιθέτως τη μειώνει ελαφρώς στα πιο λεπτόκοκκα δείγματα κι επομένως δεν αυξάνεται ο λόγος νερού προς κονία, γεγονός που δρα θετικά τόσο ως προς την τελική αντοχή του μίγματος, αλλά και ως προς την ανθεκτικότητά του. Στον Πίνακα 5 φαίνεται το ποσοστό της αντοχής της σύνθεσης με 100% τσιμέντο που επιτυγχάνεται για κάθε μία από τις δοκιμαστικές συνθέσεις. Με το κλάσμα 0-45μm επιτυγχάνεται το 87% της αρχικής αντοχής, ενώ με τα αλεσμένα μίγματα το ποσοστό αυξάνεται στο 94%. Επίσης, από τη σύγκριση της αντοχής των 7 και των 28 ημερών φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής από την προσθήκη της σκωρίας, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό στις σύγχρονες κατασκευές. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι –όπως φαίνεται στον Πίνακα 1– η σκωρία κάδου έχει υψηλό ποσοστό τόσο σε οξείδιο του ασβεστίου όσο και σε οξείδιο του πυριτίου και επομένως παρουσιάζει τόσο τσιμεντοειδείς όσο και ποζολανικές ιδιότητες.

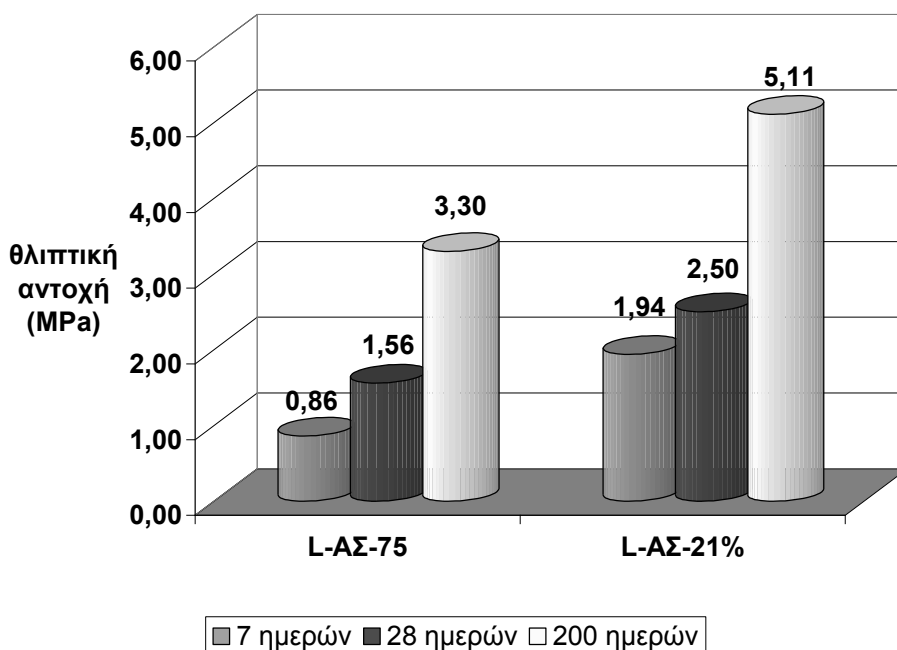
Πίνακας 5. Σύγκριση μηχανικών αντοχών δοκιμαστικών συνθέσεων με τη σύνθεση με 100% τσιμέντο

σύνθεση	Αντοχή 7 ημερών	Αντοχή 28 ημερών
	(Ποσοστό επί της πρότυπης) (%)	(Ποσοστό επί της πρότυπης) (%)
M	100%	100%
ΑΣ105	77%	76%
ΑΣ 75	82%	81%
ΑΣ 60	83%	83%
ΑΣ 45	86%	87%
ΑΣ 31%	94%	93%
ΑΣ 21%	93%	94%

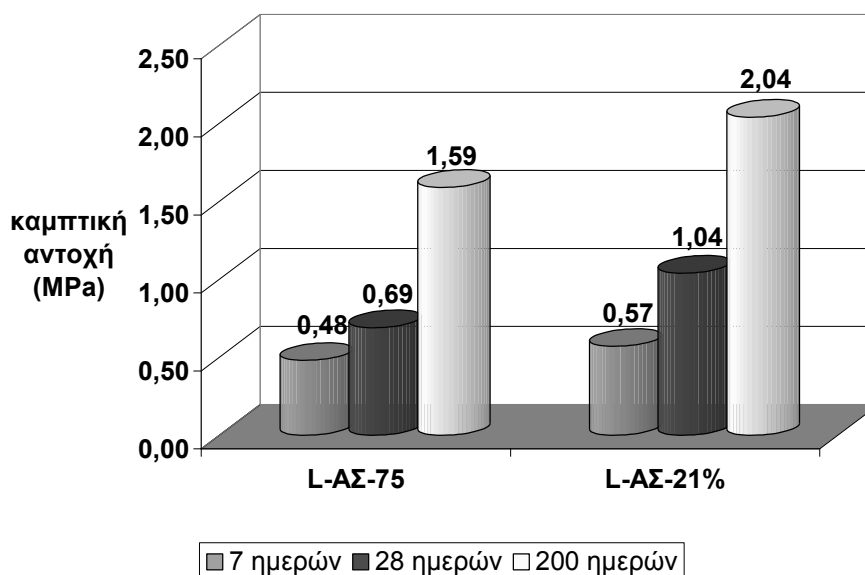
Συνθέσεις σκωρίας με υδράσβεστο

Σε συνέχεια των προηγούμενων συνθέσεων ελέγχθηκαν δύο συνθέσεις σκωρίας με υδράσβεστο, δοκιμή που καταδεικνύει κυρίως την ποζολανικότητα του υλικού. Η ανάπτυξη των θλιπτικών και των καμπτικών αντοχών των δοκιμαστικών κονιαμάτων παρουσιάζονται στις Εικόνες 2 και 3 αντίστοιχα. Για τον καλύτερο έλεγχο της ποζολανικής αντίδρασης, η οποία λαμβάνει χώρα αργά, μετρήθηκαν οι αντοχές στις 7, 28 και 200 ημέρες. Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι η σκωρία κάδου διαθέτει αξιόλογες ποζολανικές ιδιότητες, αφού ο ρυθμός ανάπτυξης αντοχών δεν ανακόπτεται στις 28 ημέρες αλλά διατηρείται με αποτέλεσμα στις 200 ημέρες να έχουμε μέγιστη αντοχή σε θλίψη 5,11 MPa και μέγιστη αντοχή σε κάμψη 2,04 MPa. Τόσο στη σύνθεση με το κλάσμα 0-75μm όσο και σε αυτή με το αλεσμένο κλάσμα 21% οι αντοχές διπλασιάζονται από τις 28 στις 100 ημέρες, γεγονός που καταδεικνύει ότι η αντίδραση της κονιάς συνεχίζεται.

Στην περίπτωση των συνθέσεων με υδράσβεστο, όπως και στις συνθέσεις με τσιμέντο, η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας με άλεση δίνει σημαντικά αυξημένες τελικές αντοχές. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των συνθέσεων σκωρίας με υδράσβεστο με αυτά των συνθέσεων σκωρίας με τσιμέντο διαπιστώνεται ότι η άλεση παίζει σημαντικό ρόλο στην ποζολανικότητα του υλικού. Επίσης, από τη βιβλιογραφία [10] φαίνεται ότι η σκωρία κάδου θα μπορούσε να ενεργοποιηθεί ακόμη περισσότερο με τη χρήση αλκαλικού καταλύτη, κάτι που θα προσέδιδε στο υλικό τα χαρακτηριστικά μιας ιδιαίτερα ισχυρής κονιάς.



Εικόνα 2. Ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής κονιαμάτων με σκωρία κάδου και υδράσβεστο



Εικόνα 3. Ανάπτυξη καμπτικής αντοχής κονιαμάτων με σκωρία κάδου και υδράσβεστο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης της σκωρίας κάδου για την παραγωγή σκυροδέματος σε αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό 20%, αλλά και η ποζολανικότητά του σε συνθέσεις με υδράσβεστο. Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

1. Η αύξηση της λεπτότητας της σκωρίας κάδου αυξάνει σημαντικά τη δραστηριότητά της ως συμπληρωματική κονία. Η αύξηση της λεπτότητας μπορεί να γίνει με κοσκίνιση ή με άλεση αν και με την τελευταία παρουσιάζονται υψηλότερες τελικές αντοχές.
2. Η σκωρία κάδου σε ποσοστό 20% αντικατάστασης του τσιμέντου στην κονία μπορεί να φτάσει το 87% της αντοχής του καθαρού τσιμέντου μετά από κοσκίνιση και το 94% της αντοχής του καθαρού τσιμέντου μετά από άλεση. Επομένως είναι μια κονία που δύναται να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή σκυροδέματος.
3. Η σκωρία κάδου δεν καθυστερεί την ενυδάτωση του τσιμέντου και δεν απαιτεί επιπλέον νερό για την επίτευξη της ίδιας εργασιμότητας με το καθαρό τσιμέντο.
4. Σαν κονία διαθέτει τόσο τσιμεντοειδείς όσο και ποζολανικές ιδιότητες γεγονός που αποδεικνύεται από το ότι η ανάπτυξη των αντοχών συνεχίζεται μέχρι και 200 ημέρες μετά την παραγωγή.
5. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα περαιτέρω ενεργοποίησης της κονίας με αλκάλια, αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Mehta P.K. 'Concrete Technology for Sustainable Development – An Overview of Essential Principles', in Mehta P.K. (ed.) *Proc. of the Int. Symposium on concrete for sustainable development in the twenty-first century*. Hyderabad, India (1999) 1-22.
- [2] Yamada K., Ishiyama S. 'Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate in mortar', in R.K. Dhir et al (eds.) *Achieving Sustainability in Construction, Proc. of the Int. Congress Global construction: ultimate concrete opportunities*. Dundee, Scotland (2005) 185-192.

- [3] Malhotra V.M., Mehta P.K. *High-performance, high volume fly ash concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories*. Ottawa, Canada: Marquardt Printing (2002).
- [4] EN 206-1 'Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity' (2000).
- [5] Motz H., Geiseler J. 'Products of steel slags an opportunity to save natural resources', *Waste Management* **21**: (2001) 285-293.
- [6] Babu K.G., Kumar V.S.R. 'Efficiency of GGBS in concrete', *Cement and Concrete Research* **27**: (2000) 1031-1036.
- [7] Papayianni I., Anastasiou E. 'Heavyweight Concrete with Steel Slag Aggregates', in R.K. Dhir et al (eds.) *Role of Concrete in Nuclear Facilities, Proc. of the Int. Congress Global construction: ultimate concrete opportunities*. Dundee, Scotland (2005) 25-32.
- [8] Claisse P.A. et al. 'Recycled Materials in Concrete Barriers', in V.M. Malhotra (ed.) *Proc. of the Sixth CANMET/ACI Int. Conference on Durability of Concrete*. Thessaloniki, Greece (2003) 951-972.
- [9] Shi C., Qian J. 'High performance cementing materials from industrial slags – a review', *Resources, Conservation and Recycling* **29** (2000) 195-207.
- [10] Xu H., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. 'The Activation of Class C-, Class F-Fly Ash and Blast Furnace Slag Using Geopolymerisation', in V.M. Malhotra (ed.) *Proc. of the Eighth CANMET/ACI Int. Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*. Las Vegas, USA (2004) 797-820.

ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελεί ένα σύγχρονο υλικό που βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην κατασκευή σηράγγων και στην επισκευή υφιστάμενων κατασκευών σκυροδέματος. Αποτελεί ένα τεχνολογικό επίτευγμα στο χώρο της δόμησης καθώς συνδυάζει τεχνική εκτόξευσης και πρόσμικτα με τα συμβατικά υλικά του σκυροδέματος, και επιτρέπει εφαρμογές όπου απαιτείται ταχεία ανάπτυξη αντοχής ή εφαρμογές που δεν μπορούν να αντιμετωπισθούν με το συμβατικό σκυρόδεμα. Όσον αφορά τα συστατικά του, είναι ένα σκυρόδεμα ιδιαίτερα πλούσιο σε τσιμέντο και μάλιστα τσιμέντο υψηλής καθαρότητας σε clinker Portland και μεγάλης λεπτότητας, όπως τα Ι42,5 και Ι52,5. Παράλληλα με το τσιμέντο χρησιμοποιούνται, ανάλογα με την απαιτούμενη πρώιμη αντοχή, πρόσθετα υλικά πουζολανικής δράσης για λόγους οικονομίας, καλύτερης αντοχής και μεγαλύτερης ανθεκτικότητας του αναμίγματος. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εργαστηριακής έρευνας όπου το τσιμέντο Portland αντικαταστάθηκε σε μικρά ποσοστά με βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως είναι η ιπτάμενη τέφρα και η σκωρία κάδου.

Λέξεις κλειδιά: εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πουζολανικά υλικά, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία κάδου.

USE OF SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF SHOTCRETE

I. Papayianni, E. Anastasiou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.

ABSTRACT: Shotcrete is a common technique used mainly for tunneling and repair of concrete structures. It is an important technological achievement in construction as it combines spraying techniques and admixtures along with traditional concrete constituents, and allows for applications requiring rapid strength development or for applications where conventional concrete is not suitable. Regarding its ingredients, shotcrete is rich in cement –a cement with high Portland clinker content and fineness, usually types CEM I42,5 or CEM I52,5. Depending on the required early strength, pozzolanic supplementary cementing materials are used along with cement for reasons of economy, improved strength, and durability of the mixture. In this report are presented the results of an experimental research where Portland cement was substituted in small percentages by industrial by-products, like high calcium fly ash and ladle furnace slag.

Keywords: shotcrete, supplementary cementing materials, fly ash, ladle furnace slag

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete, sprayed concrete, gunit) αναφέρεται ένα πλούσιο σε κονία σκυρόδεμα με λεπτόκοκκα κυρίως αδρανή, το οποίο εφαρμόζεται με την τεχνική της εκτόξευσης υπό πίεση. Στα έργα χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή σηράγγων και ως επισκευαστικό υλικό. Εμφανίστηκε ως τεχνική στις αρχές του αιώνα (Carl Akeley, 1910) και αναπτύχθηκε ταχέως και ως προς την τεχνική (dry-mix και wet-mix shotcrete) και ως προς τα πρόσθετα υλικά που ενσωματώθηκαν για βελτίωση της επιτελεστικότητάς του. Ήδη στη δεκαετία του 80, στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ενσωματώνονται, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του έργου, ίνες χάλυβα ή ίνες πολυπροπυλενίου, πουζολανικά υλικά όπως τέφρα, πυριτική κονία και χρησιμοποιούνται υψηλής αρχικής αντοχής τσιμέντα [1], [2]. Στον ελληνικό χώρο η χρήση της υγρής μεθόδου εφαρμογής εκτοξευόμενου εξοπλώνεται ευρύτερα μετά από την εμπειρία από την κατασκευή του μετρό στην Αθήνα. Η αυξανόμενη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στα έργα υποδομής επέβαλε τη σύνταξη κανονισμών. Ως κανονιστικό πλαίσιο για τη χρήση του υπάρχουν οι κανονισμοί της επιτροπής EFNARC 1996 [3], καθώς και το Σχέδιο Προδιαγραφής για Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα [4].

Τα οφέλη από τη χρήση συμπληρωματικών του τσιμέντου υλικών όπως είναι τα βιομηχανικά παραπροϊόντα με πουζολανική δραστηριότητα έχουν επισημανθεί σε διεθνές επίπεδο από πολλούς ερευνητές [5], κυρίως λόγω της οικονομίας που προκύπτει, της βελτίωσης της ανθεκτικότητας στο χρόνο και, γενικότερα, του περιβαλλοντικού οφέλους από την απορρόφηση των παραπροϊόντων επωφελώς.

Στον ελληνικό χώρο υπάρχουν πουζολανικά υλικά φυσικής προέλευσης, όπως είναι η μηλαϊκή γη, και βιομηχανικά παραπροϊόντα με πουζολανική δράση, όπως είναι οι ιπτάμενες τέφρες και η σκωρία κάδου υψικαμίνων παραγωγής χάλυβα. Στην εργασία αυτή έγινε εργαστηριακή έρευνα συνδυασμού των ελληνικών πουζολανικών υλικών ως συμπληρωματικών του τσιμέντου σε αναμίγματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η εργασία αυτή εντάσσεται στην ερευνητική δραστηριότητα του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Α.Π.Θ., έδρα της εταιρείας ΕΒΙΠΑΡ, για την αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων και εμπίπτει στους στόχους της εταιρείας. Στη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους έχει συνεισφέρει ο φοιτητής του Πανεπιστημίου της Brescia Federico Orizio, που εργάστηκε την περίοδο Μάρτιος-Σεπτέμβριος 2005 στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών, στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Ανταλλαγής Φοιτητών Erasmus.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

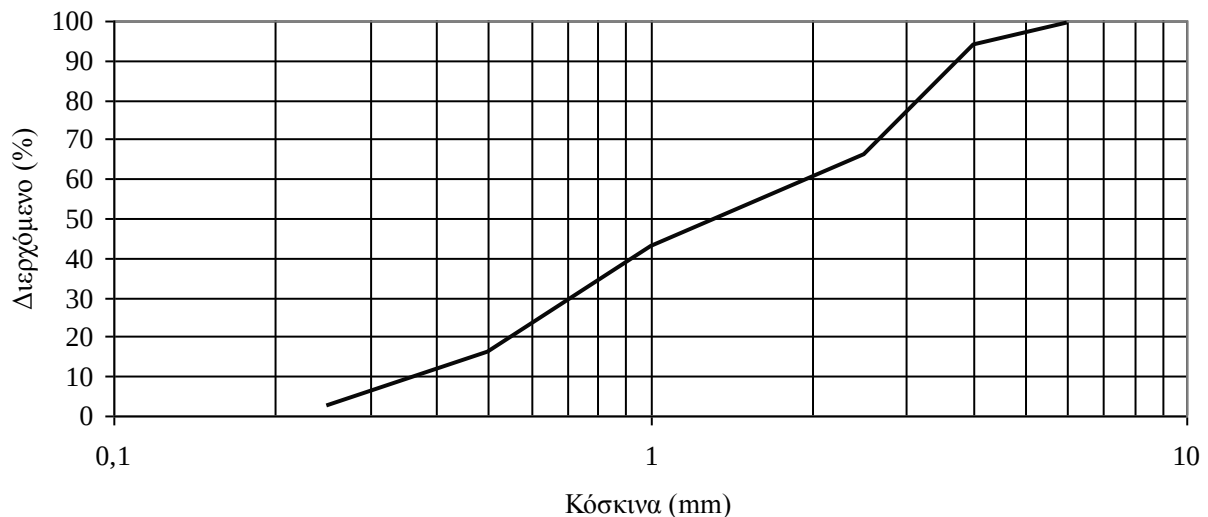
- Τσιμέντο Portland τύπου CEM I42,5 και τύπου CEM IV32,5 με 35% συναλεσμένη ιπτάμενη τέφρα (TITAN)
- Ιπτάμενη τέφρα περιοχής Πτολεμαΐδας αλεσμένη (ΔΕΗ)
- Σκωρία κάδου χαλυβουργίας αλεσμένη (ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.)
- Μηλαϊκή γη αλεσμένη (ΚΟΥΡΑΣΑΝΙΤ)
- Ρευστοποιητής Rheobuild 1-2 (Degussa)
- Αδρανές υλικό: ποτάμια άμμος 0-4mm περιοχής Αξιού

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Πουζολανικών Υλικών

Υλικό	Ιπτάμενη τέφρα	Σκωρία κάδου	Μηλαϊκή γη
Συγκρ. στο κόσκινό 45μm	19%	21%	10%
Φαιν. ειδική πυκνότητα	2,40	2,59	2,22
<u>Χημική σύσταση</u>	(%)	(%)	(%)
SiO ₂	26,0	26,1	68,3
Al ₂ O ₃	10,6	4,6	15,6
Fe ₂ O ₃	6,6	1,5	1,5
CaO	42,1	55,7	1,4
MgO	1,5	4,3	1,0
SO ₃	4,6	2,3	0,4
Na ₂ O	0,2	0,9	1,8
K ₂ O	0,8	0,2	3,0
Αδιάλυτο υπόλειμμα	21,5	-	-
Απώλεια πύρωσης	4,6	3,2	5,6

Τα χαρακτηριστικά της ιπτάμενης τέφρας, της σκωρίας κάδου και της φυσικής πουζολάνης δίνονται στον Πίνακα 1. Η κοκκομετρία της άμμου στο Διάγραμμα 1.

Σε προηγούμενη σχετική εργασία [6], σε συνεργασία με την εταιρεία Α.Τ.Ε.Β.Ε.-ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ, καθορίστηκε –με συσχετισμό στο έργο μέτρου εξάπλωσης και εκτοξευτικότητας– το επίπεδο ρευστότητας ενός αναμίγματος ώστε να είναι κατάλληλο για εκτόξευση και βρέθηκε ότι η απαιτούμενη εξάπλωση του μίγματος (μέτρο εξάπλωσης) πρέπει να είναι 44-45 cm. Τα αναμίγματα κονιών που ελέγχθηκαν με την ανάλογη ποσότητα άμμου και νερού για 44 cm εξάπλωση φαίνονται στον Πίνακα 2.



Διάγραμμα 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου

Πίνακας 2. Συνθέσεις αναμιγμάτων για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

α/α	Σύνολο κονίας (kg/m ³)	Τσιμέντο CEMI42,5 (kg)	Τσιμέντο CEMIV32,5 (kg)	Ιπτάμενη Τέφρα (kg)	Σκωρία κάδου (kg)	Μηλαϊκή γη (kg)	Άμμος (kg)	Νερό* (kg)	Ρευστ. (kg)
1	450	450	-	-	-	-	1635	225	4,5
2	450	-	450	-	-	-	1635	225	4,5
3	432	216 (50%)	-	86,5 (20%)	86,5 (20%)	43,4 (10%)	1583	225	5,5
4	574	287 (50%)	-	114 (20%)	114 (20%)	57,4 (10%)	1126	325	9,5
5	507	205 (40%)	-	152,5 (30%)	94,5 (20%)	50,9 (10%)	1340	275	7,7
6	574	228 (40%)	-	172 (30%)	114,9 (20%)	57,5 (10%)	1055	325	9,7
7	568	284 (50%)	-	-	113,7 (20%)	170,7 (30%)	1055	375	8,25
8	503	251,5 (50%)	-	-	100,6 (20%)	150,8 (30%)	1055	275	8,25
9	579	-	-	347,6 (60%)	115,8 (20%)	115,8 (20%)	1366	275	8,25

* απαιτούμενο νερό για εξάπλωση 44-45 cm

Στην εργαστηριακή αυτή έρευνα δεν έχουν χρησιμοποιηθεί επιταχυντές που προστίθενται στο ανάμιγμα που εκτοξεύεται στο έργο. Εν τούτοις, η συμβατότητα των πουζολανικών υλικών με τα πρόσμικτα αυτά έχει ελεγχθεί σε προηγούμενη εργασία [6].

Παρασκευάσθηκαν κυβικά δοκίμια 15x15x15cm, κυλινδρικά 15x30cm και πρισματικά 10x10x40cm. Όλα τα δοκίμια συντηρήθηκαν κατάλληλα σε θάλαμο για 28 ημέρες. Στη συνέχεια έγινε θραύση των δοκιμίων σε θλίψη, κάμψη, εφελκυσμό από διάρρηξη και μετρήθηκε το στατικό μέτρο ελαστικότητας από τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των μηχανικών χαρακτηριστικών φαίνονται στον Πίνακα 3 και στα Διαγράμματα 2-9.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μπορεί να λεχθεί:

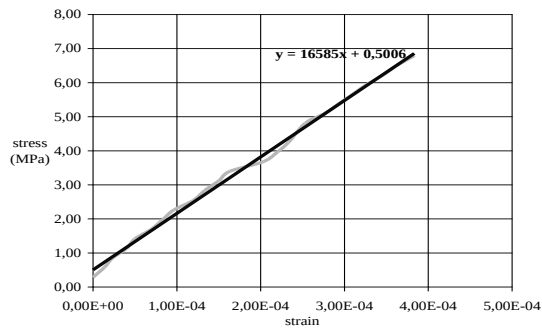
1. Υψηλότερη αντοχή αναπτύσσεται στις 28 ημέρες στο ανάμιγμα σκυροδέματος με καθαρό τσιμέντο CEM I42,5
2. Ο συνδυασμός 50-20-20-10 ή 40-30-20-10 τσιμέντου-τέφρας-σκωρίας-μηλαϊκής γης αποδίδει στις 28 ημέρες το 75-79% του αντίστοιχου αναμίγματος με CEM I42,5
3. Το τσιμέντο CEM IV32,5 ανέπτυξε σε 28 ημέρες το 55,3% της αντοχής του αντίστοιχου CEM I42,5
4. Ο συνδυασμός 50-20-30 τσιμέντου-σκωρίας-μηλαϊκής γης ανέπτυξε στις 28 ημέρες το 38% του αντίστοιχου με CEM I42,5

Θα πρέπει να σχολιασθεί βέβαια ότι λόγω της πουζολανικότητας των πρόσθετων υλικών, σε όλες τις συνθέσεις εκτός της 1 αναμένεται μεγαλύτερος ρυθμός άυξησης της αντοχής, κάτι που αποτελεί και ένα από τα πλεονεκτήματα των υλικών αυτών.

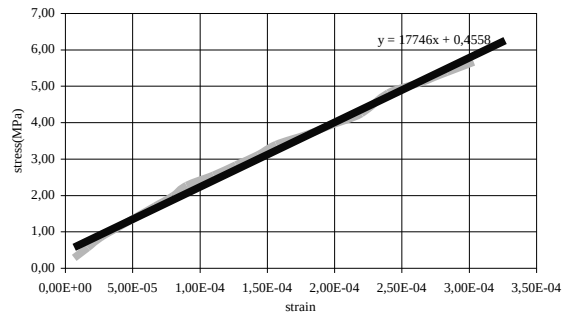
Είναι επίσης φανερό ότι για απαιτήσεις αντοχής εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατηγορίας 8/10 ή 12/15 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικά υλικά οι ιπτάμενες τέφρες και η σκωρία ή οι συνδυασμοί των υλικών, τα οποία είναι δυνατόν να αντικαταστήσουν έως το 50% του τσιμέντου CEM I42,5 είτε με συνάλεση, είτε με προσθήκη στον αναμικτήρα.

Πίνακας 3. Μηχανικά χαρακτηριστικά συνθέσεων

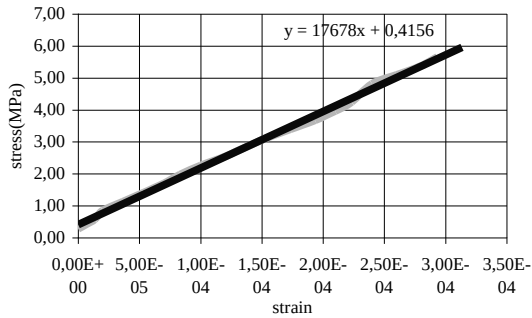
Κονία	$E_{στ}$ (GPa)	Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Αντοχή σε διάρρηξη (MPa)	Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Λόγος N/K	Εξάπλωση (cm)
450kg/m ³ CEMI 42,5	16,585	22,510	1,690	3,550	0,54	44
450kg/m ³ CEMI titan	17,746	12,435	1,240	2,710	0,54	44
~450kg/m ³ 50%cement, 20%fly ash 20% slag, 10% pozz.	10,096	14,185	0,849	2,370	0,57	44
~575kg/m ³ 50%cement, 20%fly ash 20% slag, 10% pozz	17,678	17,845	1,225	3,700	0,52	44
~500kg/m ³ 40%cement, 30%fly ash 20% slag, 10% pozz	15,158	16,405	1,230	2,330	0,53	45
~575kg/m ³ 40%cement, 20%fly ash 20% slag, 10% pozz	16,275	17,080	1,255	2,710	0,52	45
~575kg/m ³ 50%cement, 20% slag 30% pozz	14,121	15,360	1,350	3,660	0,54	45
~500kg/m ³ 50%cement, 20% slag 30% pozz	13,649	14,515	1,250	3,150	0,55	45
~575kg/m ³ 60%fly ash, 20% slag 20% pozz	10,231	8,750	0,640	2,070	0,56	42,5



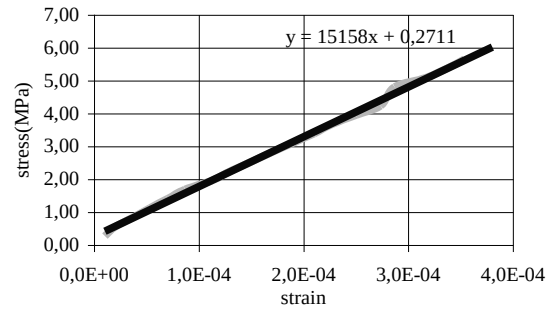
Διάγραμμα 2. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 1^{ης} σύνθεσης



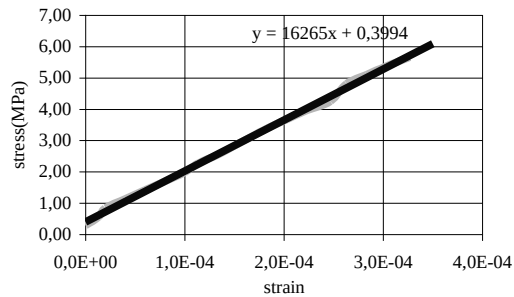
Διάγραμμα 3. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 2^{ης} σύνθεσης



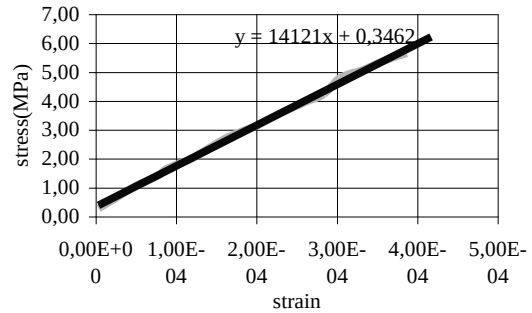
Διάγραμμα 4. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 4^{ης} σύνθεσης



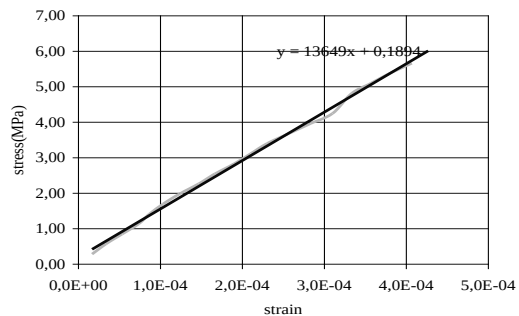
Διάγραμμα 5. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 5^{ης} σύνθεσης



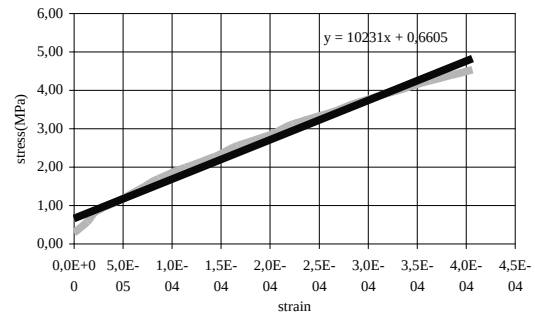
Διάγραμμα 6. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 6^{ης} σύνθεσης



Διάγραμμα 7. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 7^{ης} σύνθεσης



Διάγραμμα 8. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 8^{ης} σύνθεσης



Διάγραμμα 9. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων 9^{ης} σύνθεσης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Morgan D.R. ‘Use of Supplementary Cementing Materials in Shotcrete’ in Ryan W.G. ed. *Proc. of the Int. Workshop on the Use of Fly Ash, Slag and Silica Fume and other Siliceous Materials in Concrete* Concrete Institute of Australia, Sydney (1998) 403-432.
- [2] ACI 506R-90 Guide to Shotcrete.
- [3] EFNARC. ‘Specification for sprayed concrete: Guidelines for specifiers and contractors’, 1999.
- [4] ΥΠΕΧΩΔΕ / ΓΓΔΕ / ΓΔΠΔΕ / ΔΚΕΔΕ: ‘Σχέδιο Προδιαγραφών για το Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα’ Ενημερωτικό Δελτίο ΤΕΕ, 2114, 28-8-2000.
- [5] Kim Y.Y. et al ‘Mechanical Performance of sprayed engineered cementitious composite using wet-mix shotcrete process for repair applications’, *ACI Materials* **101** (2004) 42-49.
- [6] Α.Π.Θ. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Φ. Λυτόπουλος – Β. Φανός ‘Χρήση Ιπτάμενης Τέφρας στην Παραγωγή Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος’ Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη (2002).

Η ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΛΕΠΤΟΑΛΕΣΜΕΝΟΥ ΕΓΧΡΩΜΟΥ ΥΑΛΟΘΡΑΥΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Α. Καραμπέρη, Α. Μουτσάτσου

*Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων
Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου Αθήνα.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στα πλαίσια της αναγκαιότητας για ανακύκλωση αστικών και βιομηχανικών απορριμμάτων, η παρούσα μελέτη εστιάστηκε στην δυνατότητα αξιοποίηση τους και ιδιαίτερα του λεπτοαλεσμένου υαλοθραύσματος σε τρεις εφαρμογές δομικών υλικών. Αρχικά ερευνήθηκε η δυνατότητα προσθήκης του υαλοθραύσματος σε προϊόντα τσιμέντου είτε ως κονία είτε ως αδρανούς ή filler. Ο δεύτερος τομέας μελέτης ήταν η χρήση του για την παραγωγή αφρώδους γυαλιού. Εξετάστηκε η επίδραση της κοκκομετρίας του γυαλιού καθώς και το είδος και η περιεκτικότητα του αφριστικού μέσου στο τελικό προϊόν. Και τέλος μελετήθηκε η δυνατότητα υαλοποίησης με θερμική κατεργασία βιομηχανικών απορριμμάτων (ιπτάμενης τέφρας και σκωρίας) με την παρουσία ή μη υαλοθραύσματος και στη συνέχεια εξετάστηκε η πιθανή κρυσταλλοποίηση του παραγόμενου άμορφου προϊόντος για την κατασκευή υαλοκεραμικών.

Λέξεις κλειδιά: υαλόθραυσμα, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, υαλοποίηση, αφρώδες γυαλί

UTILIZATION OF GROUND COLOURED GLASS CULLET IN CONSTRUCTION MATERIALS

A. Karamberi, A. Moutsatsou

*Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9
Heroon Polytechniou str. 157 73 Athens*

ABSTRACT: Due to the imperative need for recycling, the present study was focused on the exploitation of domestic and industrial waste and particularly of finely ground glass cullet in three applications of structural materials. Firstly, the possible use of glass cullet in cementitious materials either as binder, aggregate or filler was studied. A second study sector was the utilization of glass cullet for the production of foam glass. The particle size effect of glass cullet and the influence of the type and content of foaming agent at the final product were examined. And finally, the vitrification with thermal treatment of industrial waste (fly ashes and slags) with or without the presence of glass cullet and the further crystallization of the glassy products for the production of glass-ceramics was studied.

Keywords: glass cullet, fly ash, slag, vitrification, foam glass

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις περασμένες δεκαετίες λόγω της επάρκειας των φυσικών πρώτων υλών παρατηρήθηκε μεγάλη σπατάλη στην χρήση τους. Μόνο πρόσφατα, άρχισε να γίνεται αντιληπτό ότι οι πόροι αυτοί είναι πεπερασμένοι. Η γνώση αυτή σε συνδυασμό με την έλλειψη κατάλληλων χώρων υγειονομικής ταφής οδήγησε στην αυξημένη αποδοχή της ανάγκης ανακύκλωσης.

Το υαλόθραυσμα αποτελεί ένα βασικό συστατικό των στερεών απορριμμάτων σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες. Σχετικά εύκολα να διαχωριστεί από τα άλλα στερεά απορρίμματα και λόγω των φυσικών και χημικών του ιδιοτήτων αποτελεί έναν κύριο υποψήφιο απόρριμμα για ανακύκλωση.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του γυαλιού το οποίο απαντάται στα στερεά απορρίμματα προέρχεται από υλικά συσκευασίας και ειδικότερα από φιάλες. Μέχρι πρόσφατα η επανάχρησή τους ήταν η κοινή πρακτική. Στις μέρες μας η τακτική αυτή έχει εγκαταλειφθεί και οι γυάλινες φιάλες κυρίως χρησιμοποιούνται μια μόνο φορά. Οι υαλουργίες μπορούν να παράγουν γυάλινες φιάλες τόσο χαμηλού κόστους όσο δεν είναι οικονομικά ανταγωνιστικές με κανενός είδους επαναχρησιμοποίηση, αγνοώντας όμως το κόστος της απόθεσής τους.

Η συνήθης μέθοδος διάθεσης του θραυσμένου πολυχρωματικού γυαλιού είναι η απόθεσή του σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Αυτή είναι μια σχετικά ακριβή λύση η οποία όχι μόνο οικονομικά είναι η λιγότερο επιθυμητή επιλογή αλλά επίσης παραβιάζει την βασική περιβαλλοντική αρχή ότι οι φυσικοί πόροι πρέπει να ανακυκλώνονται και να επαναχρησιμοποιούνται αντί απλά να απορρίπτονται.

Η εισαγωγή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας European Packaging and Packaging Waste Directive [European Parliament, 1994] έχει θέσει τους στόχους για την ανάκτηση του γυαλιού στο 60% για το 2006. Τα επίπεδα της ανάκτησης του γυαλιού ποικίλουν σημαντικά σε όλη την Ευρώπη, με πολλές χώρες ήδη έχουν επιτύχει ρυθμούς ανάκτησης οι οποίοι ικανοποιούν τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παρόλα αυτά, ορισμένες χώρες συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, πρέπει να καταβάλουν μεγάλες προσπάθειες για την επίτευξη των στόχων αυτών.

Σύγχρονη τάση αξιοποίησης του υαλοθραύσματος στον χώρο των δομικών υλικών, αποτελεί η χρήση του ως αδρανούς στην ασφάλτο, διακοσμητικού αδρανούς, συνδετικού υλικού στα κεραμικά και τα τούβλα αλλά και ως συστατικό των προϊόντων τσιμέντου [Dhir 2004, Meyer 2001].

Το γυαλί είναι ένα άμορφο υλικό το οποίο είναι πλούσιο σε πυρίτιο, χαρακτηριστικά τα οποία και τα δύο μαζί το καθιστούν υποψήφιο για ποζολανικό υλικό. Τα ποζολανικά υλικά αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου για την παραγωγή υλικών με τσιμεντιτικές ιδιότητες, δηλαδή μπορούν να συνδυαστούν με το τσιμέντο Portland σε προϊόντα τσιμέντου.

Το ιξώδες του γυαλιού μπορεί να ελεγχθεί με μεγάλη ακρίβεια με την ρύθμιση της θερμοκρασίας. Αυτό το χαρακτηριστικό του μπορεί να αξιοποιηθεί με θέρμανση σε θερμοκρασίες που θα επιτρέπουν την δημιουργία φυσαλίδων, οι οποίες θα συγκρατούνται στην κύρια μάζα του γυαλιού για σχετικά μεγάλη χρονική διάρκεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή αφρώδους γυαλιού το οποίο έχει πολλές υψηλής αξίας εφαρμογές.

Επίσης το υαλόθραυσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύον συστατικό μαζί με βιομηχανικά παραπροϊόντα για την παραγωγή «γυαλιού» και υαλοκεραμικών. Τα υαλοκεραμικά είναι πολυκρυσταλλικά στερεά τα οποία περιέχουν και υπολειπόμενη άμορφη φάση. Παράγονται από υαλόμαζα η οποία μορφοποιείται σε προϊόντα τα οποία υπόκεινται σε ελεγχόμενη κρυστάλλωση. Η γενική ιδέα της ελεγχόμενης κρυστάλλωσης ορίζει το διαχωρισμό της κρυσταλλικής φάσης από την υαλώδη αρχική φάση με την μορφή μικρών κρυστάλλων, όπου ο αριθμός των κρυστάλλων, ο ρυθμός ανάπτυξης τους και επιπλέον το τελικό τους μέγεθος ελέγχεται από την θερμική κατεργασία [Strnad 1986].

Πολλά από τα βιομηχανικά απορρίμματα λόγω της δομής τους μπορούν να υαλοποιηθούν με την προσθήκη ή μη άλλων πρώτων υλών. Τα επιλεγμένα απορρίμματα αποτελούνται κυρίως από CaO , SiO_2 , και Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ και σημαντικές ποσότητες άλλων οξειδίων των μετάλλων τα οποία μπορούν να δράσουν τροποποιητές ή μορφοποιητές πλέγματος [Frugier 2002].

Στην παρούσα μελέτη έγινε μια προσπάθεια για την αξιοποίηση του υαλοθραύσματος στα δομικά υλικά και ειδικότερα σε προϊόντα τσιμέντου είτε με την μορφή κονίας, είτε αδρανών ή filler, στην παρασκευή αφρώδους γυαλιού και ως δευτερεύοντος συστατικού στην παρασκευή γυαλιών και υαλοκεραμικών από βιομηχανικά παραπροϊόντα. Τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και ανοίγουν το δρόμο για την αξιοποίηση του γυαλιού προς αειφόρες εφαρμογές.

ΥΛΙΚΑ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το χρησιμοποιούμενο υαλόθραυσμα προέρχεται από την εσωτερική ανακύκλωση υαλουργίας κυρίως από γυάλινες φιάλες συσκευασίας τροφίμων. Χρησιμοποιήθηκε υαλόθραυσμα τριών χρωματισμών πράσινο, καφέ και λευκό που αποτελούν τους πιο κοινά χρησιμοποιούμενους χρωματισμούς στην ελληνική αγορά.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν για υαλοποίηση τέσσερα βιομηχανικά απορρίμματα πλούσια σε SiO_2 τα οποία παράγονται σε μεγάλες ποσότητες ως παραπροϊόντα διεργασίας, δύο λιγνιτικές ιπτάμενες τέφρες και δύο σκωρίες. Οι δύο χρησιμοποιούμενες τέφρες παράγονται σε ποσότητες που φτάνουν τους 11 εκατομμύρια τόνους τον χρόνο ως παραπροϊόν της καύσης του λιγνίτη στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς στην Ελλάδα στην περιοχή της Μεγαλόπολης και της Πτολεμαΐδας. Και οι δύο λιγνιτικές τέφρες κατατάσσονται στην κλάση C λόγω του υψηλού περιεχόμενου τους σε CaO το οποίο ξεπερνάει το 10%. Η μία σκωρία προέρχεται από ηλεκτρική κάμινο από την πυρομεταλλουργική επεξεργασία λατερίτη και παράγονται περίπου 1,5 εκατομμύρια τόνοι ετησίως, ενώ η δεύτερη σκωρία προέρχεται από την παραγωγή χάλυβα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη χαλυβουργία χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη scrap. Η παραγωγή της σκωρίας αυτής κυμαίνεται σε 9000 τόνους το χρόνο.

Η χημική ανάλυση όλων των ανωτέρω υλικών παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

Το υαλόθραυσμα λειοτριβήθηκε στην κατάλληλη κοκκομετρία ανάλογα με την χρήση. Οι σκωρίες λειοτριβήθηκαν κάτω από τα $90\mu\text{m}$ ενώ η μέτρηση της κοκκομετρίας των τεφρών (CIALAS GRANULOMETRE 715 D314) έδειξε 60% και 25% υπόλειμμα στα $48\mu\text{m}$ για την ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης και Πτολεμαΐδας αντίστοιχα.

Η ανάλυση με περίθλαση ακτίνων X (Siemens D5000 diffractometer, Cu K α radiation, Ni Filter) κατέδειξε ότι το υαλόθραυσμα, όπως ήταν αναμενόμενο, και η σκωρία Fe-Ni είναι άμορφα υλικά, ενώ τα φάσματα για τις δύο ιπτάμενες τέφρες και για την σκωρία χάλυβα παρουσίασαν και κρυσταλλική φάση.

Πίνακας 1: Μέσες τιμές της χημικής σύστασης των πρώτων υλών

%(w/w)	Σκωρία Fe-Ni	Σκωρία Χάλυβα	Λιγνιτική Ιπτάμενη τέφρα Μεγ/λης	Λιγνιτική Ιπτάμενη Τέφρα Πτολ/δας	Καφέ Γυαλί	Πράσινο Γυαλί	Λευκό Γυαλί
FeO	41.10	17.00	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	2.60	-	8.44	5.10	0.35	0.45	0.45
MnO	-	7.50	-	-	-	-	-
Ni-Co	0.14	-	-	-	-	-	-
SiO ₂	33.70	16.00	51.26	30.16	71.20	70.50	70.65
CaO	3.30	41.00	11.82	34.99	10.35	10.15	10.70
MgO	3.40	4.50	2.27	2.69	2.60	2.75	2.45
Al ₂ O ₃	9.30	7.00	19.39	14.93	1.90	1.80	1.75
Na ₂ O	-	-	0.53	1.01	13.15	12.95	13.25
K ₂ O	-	-	1.81	0.4	0.60	0.45	0.55
Cr ₂ O ₃	4.30	0.56	-	-	0.06	0.25	-
SO ₃	0.85	6.63	2.91	6.28	0.30	0.25	0.45

Για την παραγωγή κονιαμάτων τσιμέντου ο ανακυκλωμένο γυαλί λειοτριβήθηκε σε σφαιρόμυλους και διαχωρίστηκε σε δύο κλάσματα -200μm +90μm και -90μm ώστε να μελετηθεί η επίδραση της κοκκομετρίας του γυαλιού στα μίγματα του τσιμέντου.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε υαλόθραυσμα 90μm για την παρασκευή παστών και κονιαμάτων. Για τα επιχρίσματα τσιμέντου το υαλόθραυσμα λειοτριβήθηκε και διαχωρίστηκε σε κλάσματα αντίστοιχα με τα αδρανή των συμβατικών επιχρισμάτων.

Η ποζολανικότητα και ο ρυθμός ανάπτυξης της ποζολανικής δράσης των υαλοθραυσμάτων, της υαλοποιημένης ιπτάμενης τέφρας αλλά και των δύο ιπτάμενων τεφρών εκτιμήθηκε σύμφωνα με την δοκιμή Chapelle.

Απαραίτητη καθίσταται και η εξέταση της αλκαλοπυριτικής δράσης λόγω των υψηλών ποσοστών των αλκαλίων στα μίγματα του τσιμέντου. Η ενδεχόμενη αλκαλοπυριτική αντίδραση εξετάστηκε σε δοκίμια τα οποία περιείχαν 25% υαλόθραυσμα αντί τσιμέντου σύμφωνα με το ASTM C1260.

Η επίδραση του χρώματος και της κοκκομετρίας του υαλοθραύσματος στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών των κονιαμάτων ελέγχθηκε με την παρασκευή κονιαμάτων σύμφωνα με το EN 196 Part I και με βαθμό αντικατάσταση του τσιμέντου 25% από άσπρο, πράσινο και καφέ γυαλί - 200μm +90μm και -90μm για τις ηλικίες των 2, 7, 28 ημερών.

Στην συνέχεια ετοιμάστηκαν πάστες και κονιάματα τσιμέντου με αντικατάσταση του τσιμέντου από υαλόθραυσμα με κοκκομετρία μικρότερη από 90μm σε ποσοστά που κυμαίνονταν από 5-25% και για τους τρεις χρωματισμούς. Επιπρόσθετα προετοιμάστηκαν δοκίμια με 5% Ιπτάμενη τέφρα και 5% υαλόθραυσμα ώστε να εξακριβωθεί η πιθανή ενεργοποίηση του υαλοθραύσματος λόγω της παρουσίας της ΙΤ. Τα δοκίμια εξετάστηκαν με XRD, TG, SEM. Επιπρόσθετα, έγινε μια προσπάθεια ενεργοποίησης των δοκιμίων. Για την αλκαλική ενεργοποίηση χρησιμοποιήθηκε NaOH 1N.

Κοινό επίχρισμα τοιχοποιίας παρασκευάστηκε από λευκό τσιμέντο με αντικατάσταση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών αλλά και του filler από λευκό, καφέ και πράσινο υαλόθραυσμα σε διάφορες αναλογίες. Σε αυτή τη σειρά δειγμάτων εκτός από μέτρηση των

μηχανικών τους αντοχών εξετάστηκαν και οι ιδιότητες των νωπών κονιαμάτων και πιο συγκεκριμένα το συγκρατούμενο νερό (EN 1015-8), ο περιεχόμενος αέρας (EN 1015-7), το ειδικό βάρος (EN 1015-6) και η εξάπλωση (EN 1015-3).

Για την παραγωγή του αφρώδους γυαλιού το υαλόθραυσμα λειοτριβήθηκε και διαχωρίστηκε στα παρακάτω κλάσματα 312-250, 250-200, 200-160, 190-90, 90-71, 71-45, <45 μm . Το αφριστικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε ήταν SiC και MnO₂ με μέσω μέγεθος κόκκων κάτω από τα 45 μm .

Μετά την ανάμιξη του λειοτριβημένου υαλοθραύσματος με τα αφριστικά μέσα, η περιεκτικότητα των οποίων ήταν 1, 3, 5 % κβ, ακολουθεί σχηματοποίηση παστίλιων περίπου 1g με ελαφρά συμπίεση. Οι παστίλιες τοποθετούνται σε χωνευτήρια πλατίνας και υπόκεινται σε θερμική επεξεργασία. Η βέλτιστη θερμική κατεργασία παρατηρήθηκε ότι είναι η ακόλουθη: θέρμανση μέχρι τους 900 °C με ρυθμό 10 °C/λεπτό όπου παρέμειναν για 30 λεπτά και στην συνέχεια θέρμανση με τον προαναφερόμενο ρυθμό μέχρι τους 950 °C και διατήρηση στην θερμοκρασία αυτή για άλλη μισή ώρα.

Από παλαιότερες μελέτες έχει διαφανεί ότι η Ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας μπορεί να κατακρατήσει μεγάλες ποσότητες μετάλλων. Λόγω της πιθανής χρήσης της τέφρας σε αντίστοιχες εφαρμογές και της απαίτησης διαχείρισης του τελικού προϊόντος έγινε μια προσπάθεια για την υαλοποίηση του. Η κατακράτηση στο χρησιμοποιηθέν δείγμα έγινε σε πρότυπα διαλύματα και τα ποσοστά κατακράτησης ήταν υψηλότερα από 80% για τα μέταλλα Cu, Zn, Ni, Cd, Fe, Mn.

Δέκα διαφορετικά δείγματα από βιομηχανικά παραπροϊόντα ετοιμάστηκαν για τήξη σε προθερμασμένο φούρνο τους 1450°C για 2 ώρες. Μετά την τήξη η υαλόμαζα χυτεύτηκε σε μεταλλικό καλούπι μέχρι στερεοποίησης της και η ανόπτηση έλαβε χώρα στους 550°C για 2 ώρες. Οι συνθέσεις των δειγμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Μετά την υαλοποίηση όλα τα δείγματα υπέστησαν θερμική κατεργασία στους 900, 950 και 1000°C για δύο ώρες ώστε να επιτευχθεί η κρυστάλλωσή τους.

Η σκληρότητα των υλικών πριν και μετά την κρυστάλλωσή τους μετρήθηκε με την μέθοδο Vickers (HV300).

Πίνακας 2. Συνθέσεις για την παρασκευή γυαλιών και υαλοκεραμικών

%	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7	G-8	G-9	G-10
Λιγνιτική Ιπτάμενη τέφρα Μεγ/λης	100	80	60							
Λιγνιτική Ιπτάμενη Τέφρα Πτολ/δας				100	80	100				
Σκωρία Fe-Ni							100			
Σκωρία Χάλυβα			40					100	60	77
Καφέ γυαλί		20							40	
Πράσινο γυαλί					20					
Αιγυπτιακή άμμος										23
Μέταλλα						+				

Η εκπλυσσιμότητα των επικίνδυνων συστατικών από τα υαλοποιημένα απορρίμματα και τα υαλοκεραμικά μετρήθηκε σύμφωνα με το DIN 38414 S4. Πρέπει να σημειωθεί ότι το τεστ αυτό δεν εφαρμόζεται σε υπέρλεπτες σκόνες, όπως χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, αλλά με αυτή την παράμετρο γίνεται μέτρηση στην δυσμενέστερη περίπτωση.

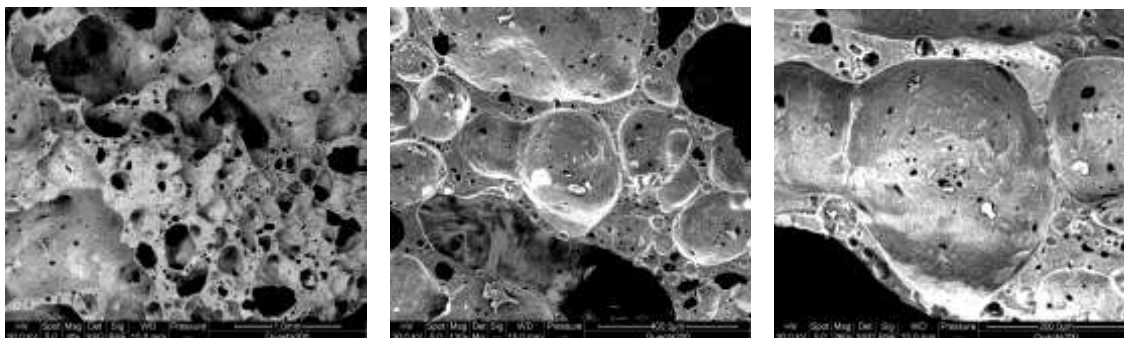
Η αντίσταση του γυαλιού σε χημική προσβολή έγινε σύμφωνα με το ASTM C 225-85.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της θλιπτικής αντοχής των κονιαμάτων για τις δύο κοκκομετρίες κατέδειξαν ότι το λεπτότερο υαλόθραυσμα παρουσιάζει και τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τις μηχανικές αντοχές των δοκιμίων [Moutsatsou 2002].

Σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από το τεστ ποζολανικής δράσης είναι φανερό ότι το λεπτοαλεσμένο γυαλί παρουσιάζει ποζολανική δράση, ασθενέστερη όμως από αυτή της ελληνικής ιπτάμενης τέφρας [Moutsatsou 2002]. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η ιπτάμενη τέφρα είχε πολύ μικρότερη λεπτότητα σε σύγκριση με το αλεσμένο γυαλί, γεγονός που συνδέεται άμεσα με την δραστηριότητα των υλικών. Το πράσινο και το λευκό υαλόθραυσμα κατέδειξαν καλύτερη συμπεριφορά από το καφέ υαλόθραυσμα. Επομένως η ανάπτυξη της ποζολανικής δράσης φαίνεται να επηρεάζεται όχι μόνο από την κοκκομετρία του υαλοθραύσματος αλλά και από την χημική του δομή. Ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι όλων των χρωματισμών τα υαλοθραύσματα με κοκκομετρία μικρότερη των 90μm δεν φαίνεται να προκαλούν διαστολή των δοκιμίων λόγω της αλκαλοπυριτικής δράσης [Moutsatsou 2002]. Από την περαιτέρω μελέτη των κονιαμάτων προκύπτει ότι η μέγιστη αποδεκτή υποκατάσταση του τσιμέντου κυμαίνεται στο 15% [Μουτσάτσου 2003]. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός την αύξησης την αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων με υαλόθραυσμα σε σχέση με το αμιγές τσιμέντο. Ενδιαφέρον επίσης είναι το φαινόμενο της μειωμένης σχετικά τιμής των αντοχών ενός έτους των παστών από τσιμέντο-γυαλί-ιπτάμενη τέφρα, ενώ τα αποτελέσματα ήταν αντίστροφα στις αντοχές των 28 ημερών [Καραμπέρη 2005]. Το φαινόμενο αυτό χρήζει περαιτέρω μελέτης. Απροσδόκητα, οι ενεργοποιημένες πάστες έδωσαν χαμηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής σε σχέση με τις μη ενεργοποιημένες πάστες. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στη χρήση πολύ αραιού διαλύματος NaOH [Moutsatsou 2004].

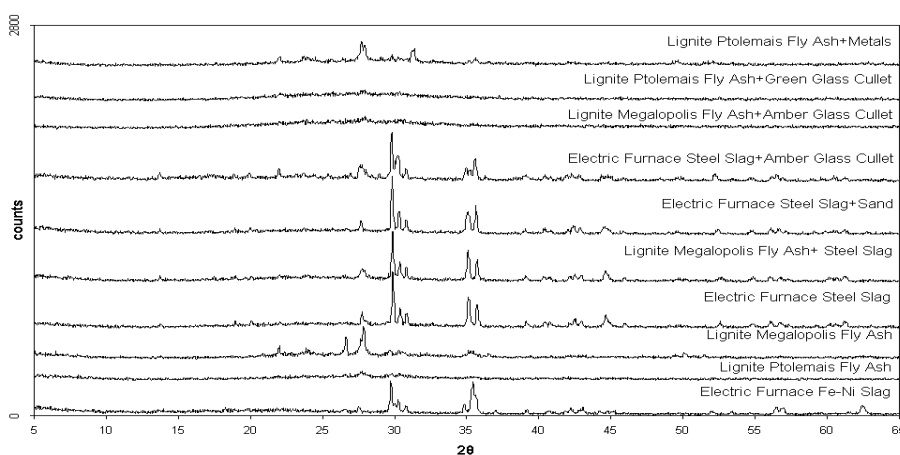
Η εφαρμογή του υαλοθραύσματος στα επιχρίσματα τοιχοποιίας βελτίωσε αισθητά την θλιπτική αντοχή τους κυρίως όταν χρησιμοποιήθηκε ως filler, χωρίς να επηρεάζει ιδιαίτερα τις ιδιότητες των νωπών κονιαμάτων [Karamberi 2004]. Ως μόνη αρνητική παρατήρηση θα μπορούσε να αναφερθεί η μείωση της εργασιμότητας των νωπών κονιαμάτων. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στην μορφή των κόκκων του υαλοθραύσματος, οι οποίοι έχουν γωνιοειδές σχήμα το οποίο ευνοεί την δημιουργία αλληλοσυνδέσεων μεταξύ των κόκκων και έχει ως επακόλουθο την μείωση της εργασιμότητας των επιχρισμάτων.



Εικόνα 1. Αφρώδες γυαλί από υαλόθραυσμα 90μm με προσθήκη 3% SiC.

Η σκόνη SiC παρουσιάζεται πολύ αποτελεσματική στην παραγωγή αφρώδους γυαλιού ακόμα και στην μικρότερη συγκέντρωση, όπως πιστοποιείται και από τις εικόνες SEM (Εικ. 1). Η οξείδωση του SiC είναι ο λόγος για τον οποίο το γυαλί σε σκόνη μπορεί να δώσει ένα αφρώδες υλικό. Η τελική δομή του αφρώδους γυαλιού εξαρτάται από την μεταβολή του ιξώδους του γυαλιού με την θερμοκρασία, τον ρυθμό θέρμανσης, την δυνατότητα εισόδου οξυγόνου και το μέγεθος των κόκκων του γυαλιού. Όσο πιο λεπτό είναι το γυαλί που χρησιμοποιείται τόσο μεγαλύτερη είναι η διόγκωση της παστίλιας και επιπλέον τόσο πιο ομοιόμορφο είναι το υλικό. Τα αποτελέσματα με την χρήση MnO_2 δεν είναι το ίδιο ικανοποιητικά. Το τελικό προϊόν έχει βαθύ μαύρο χρώμα και μεγάλη ανομοιομορφία στο μέγεθος και την κατανομή των πόρων.

Όσον αφορά την υαλοποίηση των απορριμμάτων η ανάλυση ακτίνων X έδειξε ότι όλα τα προϊόντα της θερμικής κατεργασίας στους $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ήταν άμορφα εκτός από αυτό που προέρχονταν από σκωρία Fe-Ni. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται τα φάσματα των διαφόρων υαλοποιημένων προϊόντων στους $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Πρέπει να σημειωθεί ότι πιθανότητα η σκωρία Fe-Ni λόγω της άμορφης φύσης της κρυσταλλώθηκε κατά την θερμική κατεργασία στους $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ επομένως και τα προϊόντα μετά από την θερμική κατεργασία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν μεγάλες αλλαγές. Όσον αφορά την υαλοποιημένη ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης η κύρια φάση που δημιουργήθηκε είναι anorthite. Όλα τα υαλοκεραμικά που περιέχουν σκωρία χάλυβα παρουσίασαν ανάλογη κρυσταλλική δομή. Οι κύριες κρυσταλλικές φάσεις πιθανότατα είναι diopside, anorthite, albite calcian. Ακόμα και τα δείγματα που περιείχαν Ιπτάμενη τέφρα παρουσίασαν δομή παρόμοια με αυτή των δειγμάτων με αμιγώς σκωρία χάλυβα. Από την άλλη πλευρά η παρουσία της άμμου δείχνει να ευνοεί την παραγωγή anorthite ενώ η παρουσία του υαλοθραύσματος την παραγωγή albite calcian. Παρόλα αυτά η παρουσία του γυαλιού δείχνει να μειώνει την τάση για κρυστάλλωση των δοκιμών. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην παρουσία του Na_2O και K_2O στο γυαλί τα οποία πιθανά να μειώνουν την τάση για κρυστάλλωση. Από τα δείγματα με ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας το δείγμα που προέρχεται από τέφρα που έχει χρησιμοποιηθεί αρχικά για την κατακράτηση μετάλλων (G-6) έδειξε την καλύτερη συμπεριφορά. Είναι φανερό ότι, η παρουσία μιας ποικιλίας μετάλλων ακόμα και σε μικρή περιεκτικότητα μπορεί να ευνοήσει την κρυστάλλωση. Οι κύριες κρυσταλλικές φάσεις στο συγκεκριμένο υαλοκεραμικά ήταν anorthite $CaAl_2Si_2O_8$, diopside $Ca(Mg,Al)(Si,Al)_2O_6$, Gehlenite $Ca_2Al_2SiO_7$, Augite $Ca(Mg,Al,Fe)Si_2O_6$. Όλα τα άλλα δείγματα με ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας δεν παρουσίασαν κρυστάλλωση σε καμία θερμοκρασία κατά την διαδικασία από-υαλοποίησης.

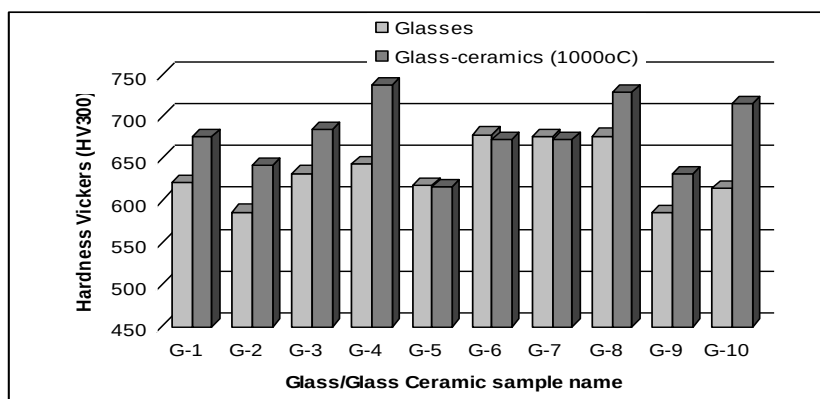


Σχήμα 2. X-ray φάσματα των παραγόμενων υαλοκεραμικών

Πολύ αισιόδοξα ήταν τα αποτελέσματα από την εκπλυσιμότητα των δοκιμών. Όλα τα δείγματα έδειξαν ελάχιστη εκπλυσιμότητα και μάλιστα κάτω από τα όρια της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας. Επιπλέον, τα αποτελέσματα από την αντίσταση σε χημική προσβολή έδειξαν τιμές ανάλογες με

αυτές του λευκού υαλοθραύσματος δηλαδή περίπου 7-7,5 ml οξέως ανά 10g γυαλιού. Τις υψηλότερες τιμές είχε η σκωρία Fe-Ni η οποία ξεπέρασε το παραπάνω όριο.

Τα υαλοποιημένα προϊόντα τα οποία περιείχαν σκωρίες παρουσίασαν υψηλότερες τιμές σκληρότητας. Η διαδικασία κρυστάλλωσης δείχνει να ευνοεί την σκληρότητα των τελικών προϊόντων. Τα αποτελέσματα της σκληρότητας παρουσιάζονται αναλυτικά στο σχήμα 3.



Σχήμα 3: Τιμές σκληρότητας των παραγόμενων γυαλιών και υαλοκεραμικών

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση του έγχρωμου υαλοθραύσματος ως μερικό υποκατάστατο του τσιμέντου αλλά και ως πρώτη ύλη για την παρασκευή αφρώδους γυαλιού δείχνει εφαρμόσιμη. Επίσης το γυαλί μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως δευτερεύον υλικό σε διάφορες εφαρμογές όπως είναι η υαλοποίηση βιομηχανικών απορριμμάτων. Αυτή η εργασία προσπάθησε να επιδείξει την ποικιλία εφαρμογών οι οποίες είναι διαθέσιμες για το γυαλί. Ενώ οι οικονομικοί και οι τεχνικοί παράγοντες τελικά μπορεί να αποκλείσουν ορισμένες εφαρμογές είναι απαραίτητο αυτή η ποικιλία να διατηρηθεί και όποτε είναι δυνατό μία δυναμική και βιώσιμη αγορά να αναπτυχθεί για αυτά τα υλικά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρόγραμμα «ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ Ι: Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στο ΕΜΠ» (ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ), το οποίο συγχρηματοδοτείται από το ΕΚΤ (75%) και από Εθνικούς Πόρους (25%).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. European Parliament and Council Directive 94/62/EC on Packaging and Packaging Waste, 1994.
2. Dhir, R.K, Dyer, T.D, 2004. Maximizing Opportunities for Recycling Glass, Proc Inter Conf Sustainable Waste Management and Recycling: Glass Waste, Kingston University, London, p. 1-16.
3. Meyer, C., Egosi, N., Andela, C. 2001. Int. Symp. Recycling and Reuse of Glass Cullet, Dundee, 179-188.
4. Strnad, Z. 1986. Glass-Ceramic Materials, Glass science and technology v.8, Elsevier.

5. Frugier, P., Godon, N., Vernaz, E., Larche, F. 2002. Influence of composition variations on the initial alteration rate of vitrified waste incineration fly-ash, *Waste Management*, 22:137-142.
6. Moutsatsou, A., Chaniotakis, E., Papageorgiou, D., Karamberi, A. 2002. *Int. Con Rec'2002*, Geneva.
7. Moutsatsou, A., Chaniotakis, E., Papageorgiou, D., Karamberi, A. 2002. Influence of Coloured Cullet on the Hydration of Cement Pastes, 6th ICCT of Developing Countries, Amman, Jordan.
8. Moutsatsou, A., Kerimis, M., Karamberi, A. 2004. Pozzolanic Behaviour of Glass Cement and Glass Cement Activated Mixtures, 7th Inter. Confer. on Concrete Technology, Kuala Lumpur, Malaysia.
9. Μουτσάτσου, Α., Ευστρατίου, Κ., Ζωϊκής Καραθανάσης, Α., Καραμπέρη, Α. 2003. Χρήση του υαλοθραύσματος και υαλοποιημένων υλικών σε προϊόντα τσιμέντου, Heleco 2003, Αθήνα.
10. Karamberi, A., Chaniotakis, E., Papageorgiou, D., Moutsatsou, A. 2004. Application of Glass Cullet in Cement Mortars, 7th Internat. Conference on Concrete Technology, Kuala Lumpur, Malaysia.
11. Karamberi, A., Kerimis, M., Moutsatsou, A. 2004. Innovating Reuse of Glass Cullet in Cement Products, Inter. Conf. Sustainable Waste Management and Recycling, Kingston, UK.
12. Καραμπέρη, Α., Χανιωτάκης, Ε., Παπαγεωργίου, Δ., Μουτσάτσου, Α. 2005. Μελέτη της επίδρασης λεπτοαλεσμένου υαλοθραύσματος σε πάστες τσιμέντου, 5ο Συνέδριο Χημ. Μηχ., Θεσσαλονίκη.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΙΔΙΚΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΥΨΗΛΟΥ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Ε. Αναστασίου, Ι. Παπαγιάννη

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία γίνεται μια διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης μεγάλων ποσοτήτων βιομηχανικών παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα με στόχο την οικονομία στην κατασκευή όσον αφορά το κόστος, την ενέργεια, την κατανάλωση φυσικών αποθεμάτων όπως είναι οι ασβεστόλιθοι. Τα παραπροϊόντα που ελέγχονται είναι η ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας και σκωρία κάδου χαλυβουργίας ως κονίες και σκωρίες χαλυβουργίας (EAF slags) ως αδρανή. Η ιπτάμενη τέφρα ελέγχεται σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 50%, η σκωρία κάδου σε ποσοστό 30%, ενώ τα αδρανή σκωρίας σε αντικατάσταση του χονδρόκοκκου κλάσματος του μίγματος αδρανών και σε αντικατάσταση όλων των κλασμάτων του μίγματος αδρανών. Στα αναμίγματα με αντικατάσταση της κονίας και των αδρανών με βιομηχανικά παραπροϊόντα, προκύπτει σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (>70MPa) μόλις με 35% κ.β. του μίγματος φυσικές ύλες. Το προτεινόμενο σκυρόδεμα διαθέτει αυξημένη θλιπτική αντοχή κατά 21% και βελτιωμένη αντοχή σε απότριψη κατά 77% σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα. Λόγω των παραπάνω και του αυξημένου ειδικού του βάρους μπορεί να βρει εφαρμογή σε κατασκευές που απαιτείται σκυρόδεμα υψηλών αντοχών, βαρύ σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα ανθεκτικό σε απότριψη.

Λέξεις κλειδιά: βιομηχανικά παραπροϊόντα, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, σκυρόδεμα

PRODUCTION OF CONCRETE OF HIGH ENVIRONMENTAL STANDARDS WITH THE USE OF INDUSTRIAL BY-PRODUCTS

E. Anastasiou, I. Papayianni

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.

ABSTRACT: The aim of this report is to incorporate large amounts of industrial by-products in concrete in an attempt to minimize the depletion of natural resources and, consequently, to diminish the environmental burden of concrete production. The by-products tested are high calcium fly ash and ladle furnace slag as binders and steel slags (EAF slags) as aggregates. Fly ash is tested in 50% replacement by weight of concrete, ladle furnace slag in 30% replacement by weight of concrete and steel slag aggregates in replacement of coarse aggregate, and also in replacement of both fine and coarse aggregate. In the mixtures where both the binder and the aggregates were substituted with industrial by-products the produced concrete is of high strength ($>70\text{MPa}$) using only 35% by weight natural products. The proposed concrete has increased compressive strength by 21% and improved abrasion resistance by 77%, compared to ordinary concrete. Due to the increased specific weight the proposed concrete can find uses in applications requiring high strength concrete, heavyweight concrete, or concrete with high abrasion resistance.

Keywords: industrial by-products, high-calcium fly ash, steel slag, concrete.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξανόμενη κατανάλωση των φυσικών πόρων από την κατασκευαστική βιομηχανία αποτελεί ένα μείζον πρόβλημα του πλανήτη με περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις.. Στην προσπάθεια για μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από την κατασκευαστική δραστηριότητα χρησιμοποιούνται –μετά από επιστημονική έρευνα για τη βέλτιστη εναλλακτική λύση– διάφορα βιομηχανικά παραπροϊόντα σε αντικατάσταση των φυσικών πρώτων υλών [1]. Το σκυρόδεμα, που αποτελεί το κυρίαρχο δομικό υλικό [2], είναι ένα πεδίο εφαρμογής καινοτομιών με στόχο όχι μόνο την εξοικονόμηση φυσικών πόρων αλλά και τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος [3]. Στην περίπτωση της χρήσης παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα ο σκοπός δεν είναι μόνο η ασφαλής και μαζική διάθεση μεγάλων ποσοτήτων υλικών που διαφορετικά θα επιβάρυναν το περιβάλλον, αλλά και η αξιοποίηση των ειδικών χαρακτηριστικών που προσδίδουν στο σκυρόδεμα για ειδικές εφαρμογές, έτσι ώστε να προστεθεί αξία στο τελικό προϊόν. Θέματα συμβατότητας των βιομηχανικών παραπροϊόντων με τα συνήθη συστατικά του σκυροδέματος εξετάζονται επιστημονικά και σε βάθος χρόνου, λόγω της αυξημένης ευαισθησίας του κοινωνικού συνόλου σε θέματα ασφάλειας των κατασκευών.

Στην παρούσα εργασία η έρευνα επικεντρώνεται στην χρήση της ιπτάμενης τέφρας που προκύπτει από την καύση του λιγνίτη στα εργοστάσια της ΔΕΗ Πτολεμαΐδας και στις σκωρίες, παραπροϊόντα της βιομηχανίας χάλυβα. Η ιπτάμενη τέφρα έχει υιοθετηθεί από τις ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες ως συστατικό blended type τσιμέντου για πάνω από 20 χρόνια και η χρήση της ως κονία έχει εφαρμογές παγκοσμίως [4], [5]. Χρησιμοποιείται στις συνθέσεις της εργασίας σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 50%. Εναλλακτικά ελέγχεται ως κονία και η σκωρία κάδου της χαλυβουργίας ΣΙΔΕΝΟΡ, σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου 30%. Επίσης, στις δοκιμαστικές συνθέσεις χρησιμοποιούνται και αδρανή σκωρίας της χαλυβουργίας ΣΙΔΕΝΟΡ, αρχικά σε αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών μόνο στα χονδρόκοκκα κλάσματα και στη συνέχεια σε όλα τα αδρανή. Τα αδρανή σκωρίας (EAF steel slag) και η σκωρία κάδου (ladle furnace slag) προκύπτουν σε διαφορετικά στάδια της παραγωγής του χάλυβα και έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Τα πρώτα δίνουν κόκκους μεγάλου μεγέθους και σκληρότητας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθέσεις σκυροδέματος ως αδρανή [6], ενώ η σκωρία κάδου προκύπτει σε λεπτή διαβάθμιση και λόγω του ότι διαθέτει ποζολανικές ιδιότητες μπορεί μετά από κοσκίνιση ή άλεση να αντικαταστήσει μικρό μέρος του τσιμέντου σε συνθέσεις σκυροδέματος [7] ή να ενσωματωθεί σε blended type τσιμέντα.

Με την ταυτόχρονη αντικατάσταση αδρανών και κονίας με παραπροϊόντα στη σύνθεση σκυροδέματος προκύπτει ένα μίγμα με μόλις 35% κ.β. φυσικές ύλες στη σύστασή του. Το σκυρόδεμα αυτό ελέγχεται ως προς την αντοχή σε θλίψη και την αντοχή σε απότριψη, ενώ εξετάζεται και η δομή και το πορώδες του. Η έρευνα εστιάζεται στην παραγωγή ενός σκυροδέματος υψηλών απαιτήσεων, με μεγάλες αντοχές και ανθεκτικότητα, αλλά ταυτόχρονα και με υψηλό οικολογικό προφίλ, λόγω της μεγάλης εξοικονόμησης φυσικών πόρων που επιτυγχάνεται.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Υλικά

Για τις δοκιμαστικές συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM I42.5, κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα με 19% συγκρατούμενο στο κόσκινο 45μm και σκωρία κάδου κοσκινισμένη σε κλάσμα 0-105μm. Για αδρανή χρησιμοποιήθηκαν άμμος ποταμού σε κλάσμα 0-4mm, θραυστά

ασβεστολιθικά αδρανή σε κλάσματα 0-4mm, 4-8mm και 8-12mm, και σκωρία σε κλάσματα 0-4mm και 4-12mm. Στον Πίνακα 1 φαίνεται η χημική ανάλυση και το ειδικό βάρος των τριών παραπροϊόντων των δοκιμαστικών συνθέσεων.

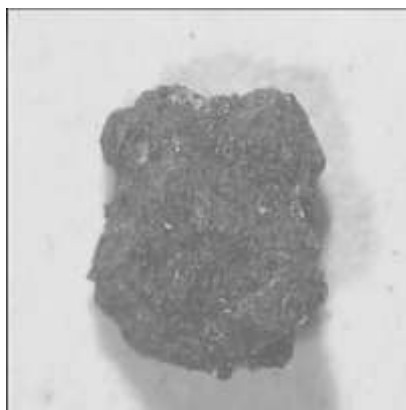
Στα αδρανή σκωρίας μετρήθηκε το ειδικό βάρος ίσο με 3,33 g/cm³, ενώ στα συμβατικά φυσικά και θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή κυμαίνεται στο 2,65-2,68g/cm³. Επίσης, μετρήθηκε η αντοχή των αδρανών σκωρίας σε κρούση και τριβή κατά Los Angeles σύμφωνα με την προδιαγραφή AASHTO T96 και βρέθηκε ίση με 15% για το κλάσμα 3/8", γεγονός που καταδεικνύει την ανθεκτικότητα του υλικού σε σχέση με τα συμβατικά ασβεστολιθικά αδρανή που δίνουν αντοχή Los Angeles 25%. Η αυξημένη ανθεκτικότητα σε θρυμματισμό των αδρανών σκωρίας οφείλεται στη σύστασή τους.

Μετρήθηκε επίσης η υδαταπορροφητικότητα των διαθέσιμων αδρανών, που βρέθηκε 1% για την άμμο ποταμού, 1,2% για τα ασβεστολιθικά αδρανή και 1,3% για τα αδρανή σκωρίας. Η αυξημένη υδαταπορροφητικότητα των αδρανών σκωρίας εν σχέσει με τα συμβατικά αδρανή αποδίδεται στον τρόπο παραγωγής τους (μεγάλη τραχύτητα επιφάνειας), αφού πρόκειται για λιωμένο υλικό που ψύχεται με καταιονισμό νερού και κοκκοποιείται, αποκτώντας ακανόνιστη επιφάνεια (Εικόνα 1). Το χαρακτηριστικό αυτό συνεισφέρει στην καλύτερη συνεκτικότητα και καλύτερη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντοπήγματος στο παραγόμενο μίγμα σκυροδέματος.

Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε υπερρευστοποιητής (Glenium) για να επιτευχθεί η απαιτούμενη εργασιμότητα διατηρώντας σταθερό το λόγο νερού προς κονία.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση παραπροϊόντων

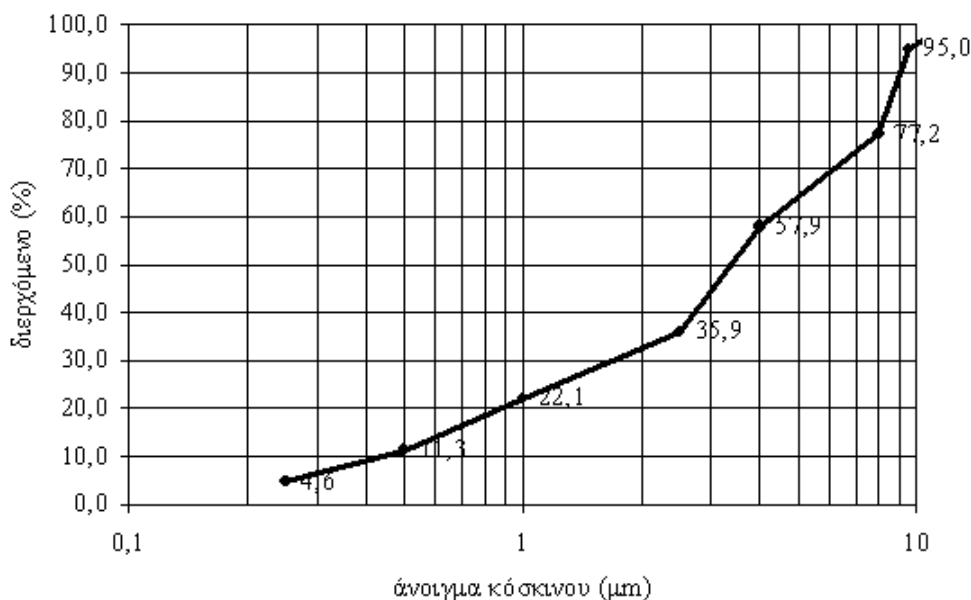
	Ιπτάμενη Τέφρα (%)	Σκωρία κάδου (%)	Αδρανή σκωρίας (%)
CaO	32,5	60,95	39
FeO	4,5	0,33	25
SiO ₂	30,8	23,15	16,5
Al ₂ O ₃	14,7	2,99	4,56
MgO	2,5	5,90	4,7
MnO	-	0,47	5,45
S	-	0,31	0,40
Na ₂ O	0,4	0,06	0,28
K ₂ O	1,5	0,01	0,07
CrO ₃	-	-	1,2
Ειδικό βάρος (g/cm ³)	2,40	2,59	3,33



Εικόνα 1. Κόκκος σκωρίας όπου διακρίνεται το ακανόνιστο σχήμα

Περιγραφή συνθέσεων

Ειδικότερα η έρευνα εστιάστηκε στην παραγωγή σκυροδέματος ανθεκτικού στην τριβή (για δάπεδα ή και δύσκαμπτα οδοστρώματα) και για αυτό το λόγο για τη σύνθεση των αδρανών έγινε κοκκομετρική ανάλυση όλων των διαθέσιμων κλασμάτων και στη συνέχεια υπολογισμός των ποσοστών του κάθε κλάσματος στο μίγμα. Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε άμμος ποταμού για καλύτερη εξομάλυνση της κοκκομετρικής καμπύλης, ειδικά μαζί με τα αδρανή σκωρίας που έχουν ιδιαίτερα χαμηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό. Ο υπολογισμός γίνεται έτσι ώστε να έχουμε ομαλή κοκκομετρική διαβάθμιση με μεγάλη σχετικά περιεκτικότητα σε χονδρόκοκκα – μόλις 22% κάτω του 1mm (Εικόνα 2)– κάτι πλεονεκτικό για την αντοχή σε απότριψη. Για όλες τις δοκιμαστικές συνθέσεις επιλέχθηκε μέγιστος κόκκος 12mm, λόγος νερού προς κονία 0,35 και περιεκτικότητα σε κονία 400 kg/m³. Πρόκειται δηλαδή για ένα σκυρόδεμα με χαμηλή εργασιμότητα και μεγάλο ειδικό βάρος, κάτι που αυξάνει περισσότερο όταν χρησιμοποιούνται τα αδρανή σκωρίας.



Εικόνα 2. Κοκκομετρική καμπύλη μίγματος αδρανών

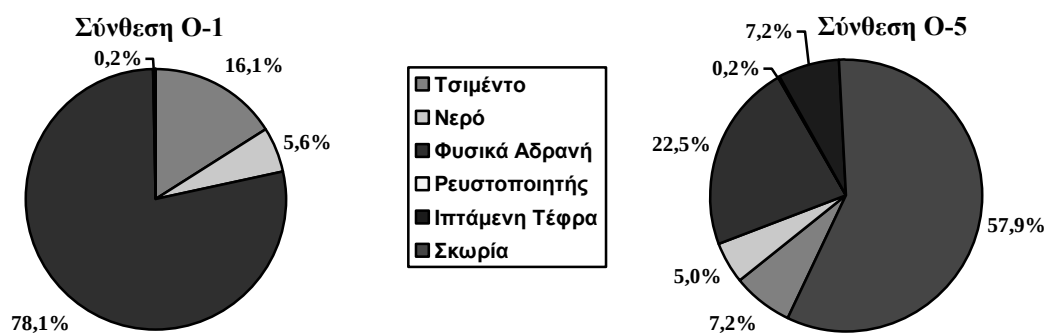
Πίνακας 2. Παράμετροι δοκιμαστικών συνθέσεων

Σύνθεση	Κονία	Λεπτόκοκκα αδρανή	Χονδρόκοκκα αδρανή	Μέγιστος κόκκος (mm)
O1	τσιμέντο	50% άμμος ποταμού 50% ασβεστολιθικά	ασβεστολιθικά	12
O2	τσιμέντο	50% άμμος ποταμού 50% ασβεστολιθικά	σκωρία	12
O3	50% τσιμέντο 50% ιπτάμενη τέφρα	50% άμμος ποταμού 50% ασβεστολιθικά	σκωρία	12
O4	70% τσιμέντο 30% σκωρία κάδου	50% άμμος ποταμού 50% ασβεστολιθικά	σκωρία	12
O5	50% τσιμέντο 50% ιπτάμενη τέφρα	50% άμμος ποταμού 50% σκωρία	σκωρία	12
O6	τσιμέντο	50% άμμος ποταμού 50% σκωρία	σκωρία	12

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 έγιναν έξι συνολικά δοκιμαστικές συνθέσεις στο εργαστήριο. Η πρώτη σύνθεση έγινε με συμβατικά αδρανή (θραυστά ασβεστολιθικά και φυσικά) και στις υπόλοιπες πέντε το χονδρόκοκκο κλάσμα των αδρανών αντικαταστάθηκε με σκωρία. Στις δύο τελευταίες συνθέσεις δε, αντικαταστάθηκε και το 50% των λεπτόκοκκων αδρανών με σκωρία. Όσον αφορά την κονία, τρεις συνθέσεις έγιναν με 100% τσιμέντο, σε δύο αντικαταστάθηκε το 50% με ιπτάμενη τέφρα και σε μία αντικαταστάθηκε το 30% με σκωρία κάδου. Η χρήση του ρευστοποιητή κυμάνθηκε από 1% ως 2,25% κ.β. της κονίας, ανάλογα με τη σύσταση της κονίας και του μίγματος αδρανών, έτσι ώστε να έχουμε σταθερή εργασιμότητα. Η εργασιμότητα μετρήθηκε με τη μέθοδο Vebe και η απαίτηση ήταν να βρίσκεται μεταξύ 10'' και 20''. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3, μικρότερη απαίτηση ρευστοποιητή είχε η σύνθεση O-1 με 100% τσιμέντο και συμβατικά αδρανή, ενώ τη μεγαλύτερη απαίτηση είχε η σύνθεση O-5 με 50% τέφρα και μέγιστη χρήση αδρανών σκωρίας, δηλαδή αυτή με τη μεγαλύτερη χρήση παραπροϊόντων. Επίσης, μετρήθηκε το ειδικό βάρος των συνθέσεων όπου από 2,388 για τη σύνθεση O-1 έφτασε το 2,775 για τη σύνθεση O-6 με μέγιστη αντικατάσταση συμβατικών αδρανών με σκωρία και 100% τσιμέντο ως κονία. Από την παρασκευή των συνθέσεων παράχθηκαν κυβικά δοκίμια 15x15x15cm στα οποία ελέγχθηκαν η αντοχή σε κάμψη και πλάκες διαστάσεων 45x45x10cm όπου ελέγχθηκε η αντοχή σε απότριψη.

Πίνακας 3. Περιγραφή δοκιμαστικών συνθέσεων

α/α	O-1	O-2	O-3	O-4	O-5	O-6
Τσιμέντο CEM I42,5 (kg/m ³)	400	400	200	200	200	400
Ιπτάμενη Τέφρα (kg/m ³)	-	-	200	-	200	-
Σκωρία κάδου (kg/m ³)	-	-	-	200	-	-
Άμμος ποταμού (kg/m ³)	523,3	601,2	588,4	591	624,1	639,4
Ασβεστολιθική άμμος (kg/m ³)	523,3	601,2	588,4	591	-	-
4-12mm ασβεστολιθικά (kg/m ³)	891,6	-	-	-	-	-
Άμμος σκωρία (kg/m ³)	-	-	-	-	624,1	639,4
4-12mm σκωρία (kg/m ³)	-	944,8	924,6	928,7	980,7	1004,7
Νερό (kg/m ³)	140	140	140	140	140	140
Ρευστοποιητής (% κ.β. της κονίας)	1%	1,75%	2%	1,5%	2,25%	1,4%
Ειδικό βάρος σύνθεσης (g/cm ³)	2,388	2,635	2,609	2,628	2,700	2,775
Λόγος νερού προς κονία (N/K)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Εργασιμότητα κατά Vebe (s)	10	17	17	17	20	19



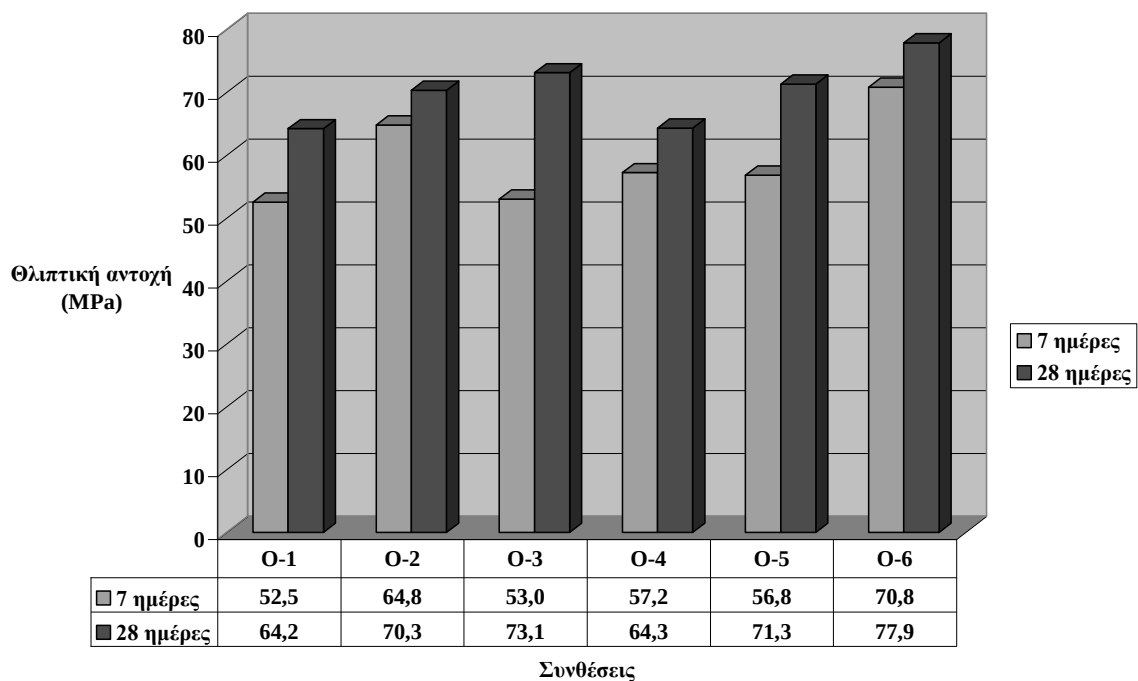
Εικόνα 3. Κατά βάρος αναλογίες σύστασης των συνθέσεων Ο-1 και Ο-5

Εξοικονόμηση πρώτων υλών

Στην Εικόνα 3 δίνεται μια εικόνα της κ.β. αναλογίας των συνθέσεων Ο-1 και Ο-5, όπου είναι εμφανής η μεγάλη εξοικονόμηση πρώτων υλών που επιτυγχάνεται. Από χρήση 100% φυσικών πρώτων υλών στη σύνθεση Ο-1 (όλα τα υλικά φτάνουμε στο 35,7% στη σύνθεση Ο-5 (ποσοστό τσιμέντου, νερού και φυσικών αδρανών). Η σύνθεση Ο-5, όπως και η σύνθεση Ο-3 περιέχουν μόνο ~7% κ.β. τσιμέντο.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αντοχή σε θλίψη



Εικόνα 1. Ανάπτυξη αντοχών κονιαμάτων με σκωρία κάδου και τσιμέντο

Πίνακας 4. Επιρροή της αντικατάστασης ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας στη θλιπτική αντοχή 28 ημερών

σύνθεση	Αντικατάσταση ασβεστολιθικών αδρανών με σκωρία	Αντοχή 28 ημερών (MPa)	Μεταβολή (%)
O-1	-	64,2	-
O-2	Χονδρόκοκκα	70,3	+9,5%
O-6	Λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα	77,9	+21,3%

Στα κυβικά δοκίμια ελέγχθηκε η ανάπτυξη της θλιπτικής αντοχής στις 7 και στις 28 ημέρες (Εικόνα 4). Μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή δίνει η σύνθεση με 100% τσιμέντο και μέγιστη αντικατάσταση αδρανών με σκωρία (O-6), ενώ όλες οι δοκιμαστικές συνθέσεις δίνουν καλύτερη αντοχή από τη σύνθεση με συμβατικά υλικά (O-1). Οι συνθέσεις O-3 και O-5 που έχουν θλιπτική αντοχή 28 ημερών 73,1 MPa και 71,3 MPa αντίστοιχα, δίνουν σκυρόδεμα υψηλής αντοχής μόλις με 200 kg/m³ τσιμέντου στο μίγμα. Επίσης, οι συνθέσεις O-5 και O-6, με θλιπτική αντοχή 28 ημερών 71,3 MPa και 77,9 MPa αντίστοιχα, περιέχουν μόλις 35,7% και 42,9% κ.β. φυσικές πρώτες ύλες.

Η διαφοροποίηση που δίνει αυτές τις αυξημένες τελικές αντοχές στις συνθέσεις είναι στη χρήση των αδρανών σκωρίας. Στον Πίνακα 4 δίνεται η επιρροή της αντικατάστασης των ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας.

Οι συνθέσεις με αντικατάσταση κονιάς με ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζουν μια καθυστέρηση στην ανάπτυξη των τελικών αντοχών αν συγκριθεί η αντοχή η αντοχή των 7 και των 28 ημερών. Αυτό είναι φυσιολογικό μια και η ιπτάμενη τέφρα δρα ποζολανικά, αντίδραση που εξελίσσεται αργά αλλά τελικά δίνει ικανοποιητικές αντοχές. Πιο συγκεκριμένα, αν συγκριθούν οι συνθέσεις O-2 και O-3 που διαφέρουν μόνο ως προς την αντικατάσταση τσιμέντου με ποζολάνη, στις 7 ημέρες η θλιπτική αντοχή της σύνθεσης με 100% τσιμέντο είναι μεγαλύτερη (64,8 MPa έναντι 53,0 MPa), αλλά στις 28 ημέρες η σύνθεση με 50% αντικατάσταση του τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα είναι λίγο μεγαλύτερη (73,1 MPa έναντι 70,3 MPa). Το γεγονός αυτό, πέρα από τη σημαντική δραστηριότητα της ιπτάμενης τέφρας ως ποζολάνη, καταδεικνύει και ότι συνεργάζεται αρμονικά με τα αδρανή σκωρίας, δίνοντας αυξημένες τελικές αντοχές.

Πίνακας 5. Επιρροή της αντικατάστασης ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας στην αντοχή σε απότριψη

σύνθεση	Αντικατάσταση ασβεστολιθικών αδρανών με σκωρία	Βάθος αυλάκωσης (mm)	Μεταβολή (%)
O-1	-	3,10	-
O-2	Χονδρόκοκκα	0,81	-73,9%
O-6	Λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα	0,70	-77,4%

Αντοχή σε απότριψη

Ο έλεγχος αντοχής σε απότριψη έγινε σύμφωνα με την τροποποιημένο κανονισμό ASTM C779. Πιο συγκεκριμένα πλάκες διαστάσεων 45x45x10cm υποβλήθηκαν σε απότριψη για χρόνο 20 λεπτών και μετρήθηκε το βάθος της αυλάκωσης. Ελέγχθηκε η επιρροή της αντικατάστασης των ασβεστολιθικών αδρανών με τα ανθεκτικότερα αδρανή σκωρίας, αρχικά στο χονδρόκοκκο και στη συνέχεια σε όλα τα κλάσματα αδρανών, δηλαδή στις συνθέσεις O-1, O-2 και O-6. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 5, όπου φαίνεται η μεγάλη συμμετοχή των αδρανών σκωρίας στην αύξηση της αντοχής σε απότριψη του παραγόμενου σκυροδέματος, αφού βελτιώνει το βάθος αυλάκωσης μέχρι και 77,4% σε σχέση με το σκυρόδεμα με συμβατικά αδρανή. Πιο συγκεκριμένα, η αντικατάσταση των χονδρόκοκκων αδρανών παίζει το σημαντικότερο ρόλο στην επίτευξη αυτής της βελτίωσης, αφού το βάθος αυλάκωσης μειώνεται κατά 73,9% μόνο με την αντικατάσταση του χονδρόκοκκου κλάσματος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η χρήση μεγάλων ποσοτήτων παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα, τόσο σε αντικατάσταση του τσιμέντου στην κονία με ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία κάδου, όσο και σε αντικατάσταση των αδρανών με σκωρία. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους ελέγχους των δοκιμαστικών συνθέσεων είναι:

1. Είναι δυνατόν να παραχθεί σκυρόδεμα αντοχής πάνω από 70MPa με 7% κ.β. τσιμέντο και 64% κ.β. βιομηχανικά παραπροϊόντα.
2. Η αντικατάσταση των χονδρόκοκκων ασβεστολιθικών αδρανών με αδρανή σκωρίας αυξάνει τη θλιπτική αντοχή κατά 9,5% και η αντικατάσταση όλων των κλασμάτων αυξάνει τη θλιπτική αντοχή κατά 21,1%.
3. Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου κατά 50% αναπτύσσει αντοχές με χαμηλότερο ρυθμό από τη σύνθεση με 100% τσιμέντο, αλλά στις 28 ημέρες η θλιπτική αντοχή είναι του ίδιου και ανώτερου επιπέδου, κάτι αναμενόμενο για μια κονία με ποζολανικές ιδιότητες.
4. Η αντικατάσταση τσιμέντου με σκωρία κάδου κατά 30% μαζί με τη χρήση χονδρόκοκκων αδρανών σκωρίας μπορεί να δώσει σκυρόδεμα ίδιας αντοχής με το σκυρόδεμα με συμβατικά υλικά στις 28 ημέρες.
5. Η χρήση αδρανών σκωρίας δίνει σκυρόδεμα με μεγάλο ειδικό βάρος ($>2,7\text{g/cm}^3$). Το σκυρόδεμα αυτό είναι πλεονεκτικό για ειδικά έργα και εφαρμογές οδοποιίας όπως τα δύσκαμπτα οδοστρώματα και οι κυβόλιθοι οδοστρωσίας.
6. Τα αδρανή σκωρίας δίνουν στο σκυρόδεμα αυξημένη αντοχή σε απότριψη, κυρίως χάρη στο χονδρόκοκκο κλάσμα αδρανών σκωρίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρόγραμμα «ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ Ι: Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στο ΕΜΠ» (ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ), το οποίο συγχρηματοδοτείται από το ΕΚΤ (75%) και από Εθνικούς Πόρους (25%).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Motz H., Geiseler J. ‘Products of steel slags an opportunity to save natural resources’, *Waste Management* **21**: (2001) 285-293.

- [2] Mehta P.K. 'Concrete Technology for Sustainable Development – An Overview of Essential Principles', in Mehta P.K. (ed.) *Proc. of the Int. Symposium on concrete for sustainable development in the twenty-first century*. Hyderabad, India (1999) 1-22.
- [3] Papayianni I., Anastasiou E. 'Heavyweight Concrete with Steel Slag Aggregates', in R.K. Dhir et al (eds.) *Role of Concrete in Nuclear Facilities, Proc. of the Int. Congress Global construction: ultimate concrete opportunities*. Dundee, Scotland (2005) 25-32.
- [4] Papayianni, I. High calcium fly ash applications in concrete construction presented at the 7th CANMET International Conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete, Chennai (Madras), India, July 22-27, 2001.
- [5] Malhotra V.M., Mehta P.K. High-performance, high volume fly ash concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories. Ottawa, Canada: Marquardt Printing (2002).
- [6] Maslehuddin, M. et al, Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes, *Construction and Building Materials*, Vol.17, 2003.
- [7] Little, A.D. *Sustainable Industrial Development: Sharing Responsibilities in a Competitive World*. Den Haag: Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 1996.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΤΗΡΩΝ ΣΤΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Κ. Κ. Σίδερης¹, Γ. Μπατής², Ε. Δούδαλη¹, Σ. Μπουντζή¹.

¹*Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Βασ. Σοφίας 12, 67 100, Ξάνθη*

²*Σχολή χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου Αθήνα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία μελετάται η δυνατότητα χρήσης τέφρας αποτεφρωτήρων για την παρασκευή τσιμεντοκονιαμάτων. Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν τσιμεντοκονιάματα με τσιμέντο Ι42.5R και τέφρα αποτεφρωτήρων σε ποσοστά 5, 10,15 και 20% με αντικατάσταση του τσιμέντου ή των αδρανών υλικών (άμμος). Οι ιδιότητες που μετρήθηκαν ήταν η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή, χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας στο χρόνο (ενανθράκωση, διείδυση χλωριόντων και διάβρωση οπλισμού) και η μόλυνση που τυχόν προκαλείται λόγω έκλυσης βαρέων μετάλλων, σε διάφορες ηλικίες. Η προσθήκη της τέφρας οδηγεί σε μείωση των αντοχών των τσιμεντοκονιαμάτων, η οποία είναι μικρή για χαμηλό ποσοστό (5%) αντικατάστασης της άμμου. Γενικά η προσθήκη της τέφρας προκαλεί σημαντική αύξηση του βάθους ενανθράκωσης όλων των μειγμάτων, ενώ ακόμα μεγαλύτερη είναι η αύξηση της διαπερατότητας των χλωριόντων. Για το λόγο αυτό προτείνεται η χρήση της συγκεκριμένης τέφρας μόνο για την παρασκευή άοπλων τσιμεντοκονιαμάτων σε μικρό (5%) ποσοστό αντικατάστασης της άμμου. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι σε καμία περίπτωση δεν παρατηρήθηκε μόλυνση λόγω έκλυσης μετάλλων.

Λέξεις κλειδιά: τέφρα αποτεφρωτήρων, σύνθετα τσιμέντα, σκυρόδεμα, ανθεκτικότητα.

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY TO USE INCINERATOR ASH FOR CONSTRUCTIONS

K. K. Sideris¹, G. Batis², E. Dudali¹ and S. Buntzi¹,

¹*Lab. of Building Materials, Department of Civil Engineers, DUTH, 12 Vas. Sophias str, 671 00 Xanthi*

²*School of Chemical Engineers, NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. 157 79 Athens.*

ABSTRACT: In this paper the possibility to use incinerator ash for the production of cement mortars is experimentally investigated. Incinerator ash was used for the production of normal cement mortars replacing cement or aggregates at different percentages per weight of cement (5, 10, 15 and 20%). Different mechanical and durability characteristics were measured at different ages: compressive strength, flexural tensile strength, carbonation, chloride penetration and steel corrosion. The results indicate that it is possible to produce cement mortars for non-reinforced concrete by using small quantities of incinerator ash. When the ash was used for replacing the sand at percentages of 5 and 10% per weight of cement the compressive and flexural tensile strength of mortars at the ages of 180 days were slightly reduced. However the carbonation depth and the chloride permeability of mortars were significantly increased when the ash was used at any percentage, either at replacing the cement or the aggregates.

Keywords: incinerator ash, blended cements, concrete, durability.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάθεση των στερεών αποβλήτων είναι ένα σημαντικό παγκόσμιο πρόβλημα. Για την διάθεση των στερεών αποβλήτων σήμερα υπάρχουν τρεις μέθοδοι:

- Η υγειονομική ταφή (XYTA)
- Η θερμική κατεργασία (καύση, πυρόλυση)
- Η λιπασματοποίηση

Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επίσης ανάλογα με τη φύση του αποβλήτου μπορεί να είναι κατάλληλη η χρήση μίας ή περισσότερων μεθόδων. Ειδικά για τα τοξικά απόβλητα η χρήση της καύσης ή πυρόλυσης είναι η πλέον κατάλληλη μέθοδος. Είναι γνωστό ότι έχει ήδη δρομολογηθεί η δημιουργία δύο αποτεφρωτήρων στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Παραπροϊόν της μεθόδου της καύσης ή της πυρόλυσης είναι η παραγόμενη τέφρα. Πολλές φορές η απόθεση της τέφρας των αποτεφρωτήρων σε XYTA δεν είναι δυνατή λόγω τοξικών μετάλλων. Μία λύση για την διάθεση της τέφρας αυτής είναι η χρησιμοποίηση της στο τσιμέντο (Soeda et Ichimura, 2003).

Η παρούσα εργασία εξετάζει την δυνατότητα χρησιμοποίησης της τέφρας μικρού αποτεφρωτήρα στο τσιμέντο.

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Πόρτλαντ Ι42.5R και τέφρα αποτεφρωτήρων. Η τέφρα προερχόταν από μικρό σχετικά αποτεφρωτήρα που χρησιμοποιείται για την καύση της συσκευασίας (στερεών ή υγρών) φυτοφαρμάκων. Γενικά τα υλικά συσκευασίας φυτοφαρμάκων δεν μπορούν να διατεθούν σε XYTA λόγω της τοξικότητάς τους. Τα υλικά τα οποία αποτεφρωνόταν στον συγκεκριμένο αποτεφρωτήρα χαρτί, ξύλο, διάφορα πολυμερή και φιάλες αλουμινίου. Η χημική σύσταση των υλικών αυτών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χημική σύσταση τσιμέντου και τέφρας αποτεφρωτήρων.

Τσιμέντο Ι42.5R		Τέφρα αποτεφρωτήρων	
Περιεκτικότητα (%)		Περιεκτικότητα (%)	
SiO ₂	19.64	C	1.40
Al ₂ O ₃	4.62	SiO ₂	30.22
Fe ₂ O ₃	3.27	CaO	26.00
CaO	63.59	Fe ₂ O ₃	12.19
MgO	1.91	Al ₂ O ₃	25.71
SO ₃	3.03	K ₂ O	2.76
K ₂ O	0.62	S	0.05
Na ₂ O	0.38	Cl ⁻	0.41
Λεπτότητα (cm ² /gr)	3519	Υγρασία (%)	1.26

Με τα υλικά αυτά παρασκευάστηκαν δοκίμια τσιμεντοκονιάματος με αναλογία τσιμέντου:άμμου:νερού ίση με 1:3:0.5. Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε πυριτική άμμος με μέγιστο κόκκο 2 mm. Η τέφρα χρησιμοποιήθηκε σε ποσοστά 5, 10, 15 και 20% ως ποσοστό αντικατάστασης του τσιμέντου ή της άμμου. Παρασκευάστηκαν συνολικά 9 μείγματα, οι αναλογίες των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Αναλογίες μείξεως παρασκευασθέντων κονιαμάτων

	Τσιμέντο I42.5R	Ποσοστό αντικατάστασης τσιμέντου άμμου		Τέφρα αποτεφρ.	Άμμος	Νερό	Ρευστ/τής	Εξάπλωση
A/A	(gr)	(%)	(%)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(cm)
1ο	450.0	0%	-	0.0	1350.0	225.0	5.0	22.0
2ο	427.5	5%	-	22.5	1350.0	225.0	7.5	19.0
3ο	405.0	10%	-	45.0	1350.0	225.0	7.5	18.0
4ο	382.5	15%	-	67.5	1350.0	225.0	10.0	14.5
5ο	360.0	20%	-	90.0	1350.0	225.0	20.0	12.5
6ο	450.0	-	5%	22.5	1327.5	225.0	5.0	18.0
7ο	450.0	-	10%	45.0	1305.0	225.0	10.0	16.0
8ο	450.0	-	15%	67.5	1282.5	225.0	12.5	16.0
9ο	450.0	-	20%	90.0	1260.0	225.0	20.0	13.5

Στα κονιάματα προστέθηκαν διαφορετικές ποσότητες υπερρευστοποιητή προκειμένου να επιτευχθεί μία όσο το δυνατόν πλησιέστερη προς το μείγμα αναφοράς εξάπλωση. Κατ' αυτό τον τρόπο μελετήθηκε και η επίδραση της συγκεκριμένης τέφρας στην εργασιμότητα των μειγμάτων. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν ήταν πρίσματα, διαστάσεων 40x40x160mm και κύλινδροι διαστάσεων 60x100 mm. Οι ιδιότητες που μελετήθηκαν ήταν η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή, το βάθος ενανθράκωσης, η απώλεια βάρους οπλισμών λόγω διείδυσης χλωριόντων καθώς και η μόλυνση που τυχόν προκαλείται λόγω έκπλυσης βαρέων μετάλλων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

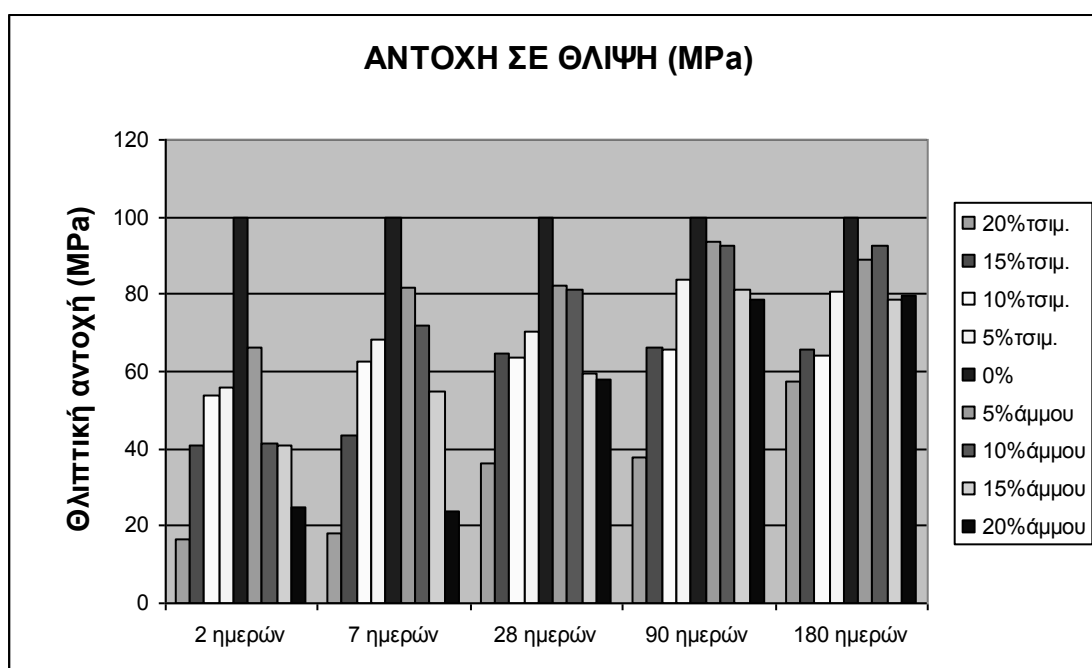
Θλιπτική αντοχή

Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε σε πρισματικά δοκίμια που προηγουμένως είχαν θραυσθεί σε κάμψη. Η αντοχή μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28, 90 και 180 ημερών. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε θάλαμο υγρασίας μέχρι την ηλικία της μέτρησης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (κατά EN 196-1) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 και στο Σχήμα 1.

Πίνακας 3: Εξέλιξη θλιπτικής αντοχής μειγμάτων.

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (MPa)					
ΜΕΙΓΜΑΤΑ	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών	90 ημερών	180 ημερών
20% τσιμ.	3.33	6.15	13.96	15.94	25.73
15% τσιμ.	8.33	14.58	24.79	28.02	29.48
10% τσιμ.	10.94	21.04	24.48	27.81	28.85
5% τσιμ.	11.35	23.02	27.08	35.52	36.35
0%	20.42	33.65	38.44	42.29	45.00
5% άμμου	13.54	27.50	31.67	39.58	40.10
10% άμμου	8.44	24.17	31.15	39.17	41.77
15% άμμου	8.33	18.44	22.81	34.37	35.31
20% άμμου	5.10	8.02	22.29	33.23	35.73

Από το Σχήμα 1 φαίνεται ότι η τέφρα προκαλεί μείωση της θλιπτικής αντοχής σε όλα τα ποσοστά που εξετάστηκε. Η μείωση όπως θα ανέμενε κανείς είναι μεγαλύτερη όταν η τέφρα αντικαθιστά το τσιμέντο και μικρότερη όταν αντικαθιστά τα αδρανή. Επίσης το ποσοστό μείωσης εξαρτάται και



Σχήμα 1: Επίδραση της τέφρας στη μείωση της θλιπτικής αντοχής σε διαφορετικές ηλικίες.

από την ηλικία της μέτρησης. Η επίδραση της τέφρας στη μείωση της αντοχής είναι πολύ μεγάλη στις πρώιμες ηλικίες (2 και 7 ημέρες), ενώ μειώνεται όσο αυξάνεται η ηλικία όπως έντονα εμφανίζεται στην ηλικία των 6 μηνών. Η θλιπτική αντοχή του μείγματος αναφοράς στην ηλικία των 28 ημερών μειώνεται κατά 18 και 19% αντίστοιχα όταν η τέφρα χρησιμοποιείται σε ποσοστά 5 και 10% σε αντικατάσταση της άμμου. Η αντίστοιχη όμως μείωση στην ηλικία των 6 μηνών περιορίζεται σε 11 και 8%. Φαίνεται λοιπόν ότι η συγκεκριμένη τέφρα παρουσιάζει μία ασθενή ποζολανική δράση, η λειτουργία της οποίας έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό επιπλέον ενύδρων σε μεγάλες ηλικίες.

Εφελκυστική αντοχή

Η εφελκυστική αντοχή μετρήθηκε σε πρισματικά δοκίμια που συντηρήθηκαν σε θάλαμο υγρασίας μέχρι την ηλικία της μέτρησης. Η αντοχή μετρήθηκε για όλα τα μείγματα στις ηλικίες των 2, 7, 28, 90 και 180 ημερών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (κατά EN 196-1) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

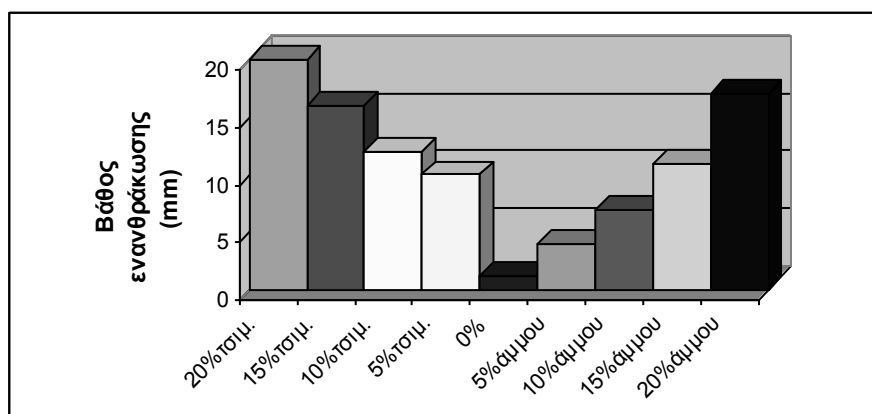
Πίνακας 4: Εξέλιξη εφελκυστικής αντοχής μειγμάτων.

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΠΤΙΚΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ (MPa)					
ΜΕΙΓΜΑΤΑ	2 ημερών	7 ημερών	28 ημερών	90 ημερών	180 ημερών
20% τσιμ.	0.03	0.04	0.08	0.08	0.12
15% τσιμ.	0.05	0.08	0.13	0.14	0.15
10% τσιμ.	0.07	0.10	0.16	0.17	0.18
5% τσιμ.	0.07	0.12	0.15	0.16	0.17
0%	0.10	0.14	0.18	0.18	0.17
5% άμμου	0.09	0.12	0.16	0.19	0.18
10% άμμου	0.07	0.12	0.15	0.17	0.15
15% άμμου	0.05	0.09	0.13	0.14	0.17
20% άμμου	0.04	0.06	0.13	0.15	0.14

Η εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής ακολουθεί ανάλογη πορεία με αυτήν της θλιπτικής αντοχής. Και πάλι η μείωση των αντοχών είναι μεγαλύτερη όταν η τέφρα αντικαθιστά το τσιμέντο και μικρότερη όταν αντικαθιστά τα αδρανή. Η μεγάλη πτώση που παρατηρείται κατά τις πρώιμες ηλικίες μειώνεται μετά τις 28 ημέρες, ιδίως για τα μικρά ποσοστά (5 και 10%) αντικατάστασης των αδρανών.

Βάθος ενανθράκωσης

Το βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια 40x100mm. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην ηλικία των 7 ημερών σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης με συγκέντρωση $\text{CO}_2=10\%$ και $\text{RH}=70\%$. Στο θάλαμο αυτόν παρέμειναν για έξι εβδομάδες. Στη συνέχεια θραύστηκαν σε διάρρηξη και ψεκάστηκαν με διάλυμα φαινολοφθαλαίνης, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της RILEM CPC18. Το βάθος ενανθράκωσης κάθε μείγματος αποτελεί το μέσο όρο των τιμών τριών δοκιμίων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.



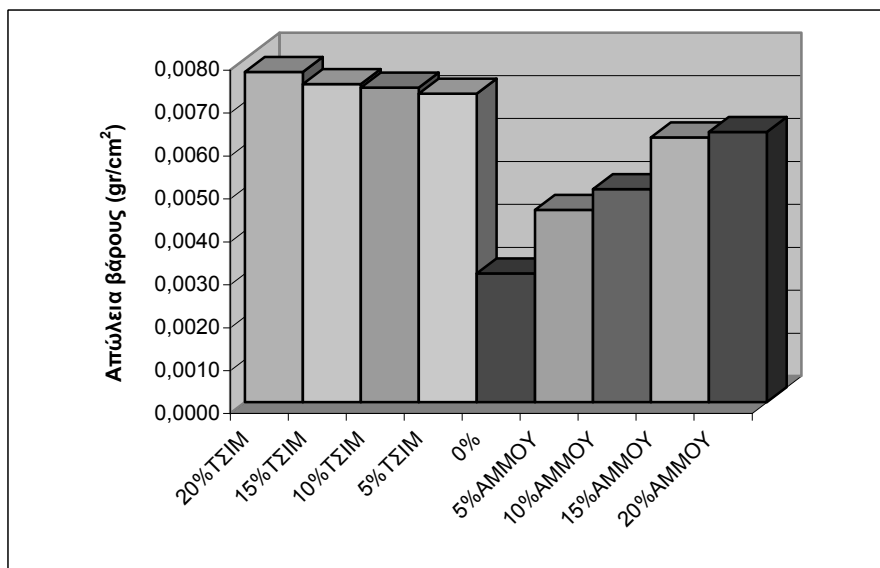
Σχήμα 2: Μεταβολή βάθους ενανθράκωσης μειγμάτων.

Το βάθος ενανθράκωσης του μείγματος αναφοράς παραμένει μετά από έξι εβδομάδες παραμονής στο θάλαμο, σχεδόν μηδενικό. Αντιθέτως, το αντίστοιχο βάθος των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με τέφρα αποτεφρωτήρων αυξάνεται. Η αύξηση αυτή είναι ανάλογη του ποσοστού προσθήκης της τέφρας και παρουσιάζεται μεγαλύτερη στα μείγματα στα οποία αυτή αντικαθιστά το τσιμέντο και μικρότερη σε αυτά στα οποία αντικαθιστά την άμμο. Είναι πάντως αξιοσημείωτο το γεγονός ότι ακόμη και σε μείγματα με μικρό ποσοστό (5%) αντικατάστασης της άμμου το βάθος ενανθράκωσης αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με το μείγμα που δεν περιέχει τέφρα.

Διάβρωση οπλισμού λόγω διείσδυσης χλωριόντων

Η απώλεια βάρους των οπλισμών λόγω διείσδυσης χλωριόντων μετρήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια στο κέντρο των οποίων είχε τοποθετηθεί χαλύβδινη ράβδος οπλισμού S500s με διάμετρο 10 mm. Τα δοκίμια παρέμειναν για 14 ημέρες σε περιβάλλον εργαστηρίου ($T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $\text{RH}=60\%$) και στη συνέχεια εμβαπτίστηκαν μέχρι το ήμισυ του ύψους τους σε διάλυμα 5% NaCl. Τα δοκίμια παρέμειναν στο διάλυμα έκθεσης για 6 μήνες. Στη συνέχεια θραύστηκαν και αφού καθαρίστηκε ο χαλύβδινος οπλισμός, μετρήθηκε η απώλεια του βάρους του. Η απώλεια βάρους κάθε μείγματος αποτελεί το μέσο όρο των τιμών τριών δοκιμίων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 3. Από το σχήμα αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι η προσθήκη τέφρας αποτεφρωτήρων στο μείγμα αυξάνει την απώλεια βάρους των οπλισμών λόγω διείσδυσης χλωριόντων. Η απώλεια είναι ανάλογη του ποσοστού προσθήκης της τέφρας μόνο στα μείγματα στα οποία η τέφρα αντικαθιστά

την άμμο, ενώ στα μείγματα στα οποία αντικαθιστά το τσιμέντο η απώλεια οπλισμού είναι πολύ υψηλή, σχεδόν διπλάσια της τιμής του μείγματος αναφοράς, και σχεδόν σταθερή. Ακόμη όμως και για ποσοστό 5% αντικατάστασης της άμμου η απώλεια βάρους του οπλισμού είναι κατά 48% μεγαλύτερη αυτής του μείγματος αναφοράς,, καθιστώντας απαγορευτική τη χρήση της συγκεκριμένης τέφρας για οπλισμένα δομικά στοιχεία που έρχονται σε επαφή με διαλύματα χλωριόντων.



Σχήμα 3: Μεταβολή απώλειας βάρους οπλισμού μειγμάτων

Έκπλυση βαρέων μετάλλων

Οι μετρήσεις της έκπλυσης βαρέων μετάλλων πραγματοποιήθηκαν σε πρισματικά δοκίμια 40x40x160mm. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν στην ηλικία των 7 ημερών σε πλαστικό δοχείο με απιονισμένο νερό τετραπλάσιου όγκου. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα λαμβανόταν δείγμα από το νερό έκθεσης και πραγματοποιούνταν μετρήσεις περιεκτικότητας μετάλλων στην συσκευή ατομικής απορρόφησης του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για την ηλικία των 28 ημερών και 6 μηνών στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Μετρήσεις έκπλυσης βαρέων μετάλλων (ppm στο διάλυμα έκθεσης)						
ΜΕΙΓΜΑ	Συγκέντρωση Cu		Συγκέντρωση Fe		Συγκέντρωση Zn	
	28 ημ	6 μήνες	28 ημ	6 μήνες	28 ημ	6 μήνες
0%	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01
5%ΤΣΙΜ	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00	0.06
10%ΤΣΙΜ	0.08	0.05	0.02	0.00	0.03	0.14
15%ΤΣΙΜ	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.13
20%ΤΣΙΜ	0.04	0.04	0.01	0.00	0.00	0.08
5%ΑΜΜΟΥ	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.07
10%ΑΜΜΟΥ	0.02	0.03	0.00	0.01	0.01	0.04
15%ΑΜΜΟΥ	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.07
20%ΑΜΜΟΥ	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04

Από τον Πίνακα αυτόν παρατηρούμε ότι δεν σημειώνεται σημαντική διαφοροποίηση της συγκέντρωσης μετάλλων που μετρήθηκαν στα διαλύματα των μειγμάτων που παρασκευάστηκαν με προσθήκη τέφρας σε σύγκριση με το μείγμα αναφοράς. Οι τιμές της συγκέντρωσης αυξάνονταν ανάλογα με το ποσοστό προσθήκης της τέφρας, σε κάθε περίπτωση όμως παρέμεναν σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα. Παράλληλα με τα ανωτέρω στο διάλυμα εμφάνισης έγιναν μετρήσεις ανίχνευσης μολύβδου. Σε κάθε περίπτωση η συγκέντρωση ήταν ιδιαίτερα χαμηλή, χαμηλότερη από την ελάχιστη τιμή που η συσκευή μπορούσε να μετρήσει.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας φαίνεται ότι η συγκεκριμένη τέφρα αποτεφρωτήρων είναι ένα βιομηχανικό παραπροϊόν με ασθενείς ποζολανικές ιδιότητες. Η προσθήκη της στο μείγμα τσιμεντοκονιάματος προκαλεί μείωση των μηχανικών αντοχών, ιδιαίτερα στις πρώιμες (2 και 7 ημέρες) ηλικίες. Σε μεγαλύτερες ηλικίες (180 ημέρες) η πτώση των αντοχών περιορίζεται σε ποσοστά κάτω του 10%, ιδίως για τα μείγματα με μικρό ποσοστό προσθήκης τέφρας σε αντικατάσταση του βάρους της άμμου. Η προσθήκη της συγκεκριμένης τέφρας όμως αυξάνει σε μεγάλο ποσοστό τόσο το βάθος ενανθράκωσης των μειγμάτων, όσο και την απώλεια του χαλύβδινου οπλισμού τους λόγω διείδυσης χλωριόντων από το εξωτερικό περιβάλλον.

Φαίνεται λοιπόν ότι η συγκεκριμένη τέφρα μπορεί να προστεθεί σε μικρά ποσοστά στα μείγματα αόπλου σκυροδέματος αντικαθιστώντας μέρος των αδρανών υλικών, χωρίς ουσιαστικά προβλήματα όσον αφορά την απώλεια των μηχανικών αντοχών σε ηλικίες μεθυσστερες των 28 ημερών. Αντίθετα, η επίδρασή της στην αύξηση του βάθους ενανθράκωσης και της διείδυσης χλωριόντων καθιστούν τη χρήση της στα μείγματα οπλισμένου σκυροδέματος απαγορευτική.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Comite Europeene de Normalisation 1995. Method of Testing Cement, Determination of Strength, EN 196-1.

RILEM TC 56, (1988). Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC 18, *Materials and Structures*, Vol 21, (126), pp.453-455.

Soeda K., Ichimura T. 2003. Present state of corrosion Inhibitors in Japan, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 117-122.

ΦΥΣΙΚΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ ΩΣ ΑΔΡΑΝΗ

Στ. Γκαβέλα, Χ. Χατζηφώτη, Ν. Χατζηφώτης, Β. Κασελούρη - Ρηγοπούλου

*Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων
Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου Αθήνα*

Σ. Κόλιας

*Εργαστήριο Οδοποιίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73
Ζωγράφου Αθήνα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή μελετάται η αξιοποίηση πλαστικών απορριμμάτων ως μέρος των αδρανών του σκυροδέματος. Το πολυμερές που εξετάστηκε ήταν πολυπροπυλένιο που προέρχεται από μηχανική ανακύκλωση βιομηχανικών απορριμμάτων. Σε όλα τα αδρανή (γαρμπίλι, άμμος και πολυμερές) έγινε κοκκομετρική ανάλυση και προσδιορισμός του ειδικού τους βάρους και της υδαταπορρόφησής τους. Παρασκευάστηκαν μίγματα που περιείχαν 0%, 7%, 12% και 20% κατ' όγκον αδρανών πολυπροπυλένιο. Προσδιορίστηκε η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος, η αντοχή σε θλίψη και κάμψη σε 7 και 28 ημέρες από την παρασκευή των μιγμάτων καθώς και προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας και της επιφανειακής υδαταπορρόφησης.

Λέξεις κλειδιά: σκυρόδεμα, αδρανή, θερμοπλαστικά απορρίμματα

PHYSIKO - MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING THERMOPLASTIC WASTES AS AGGREGATES

Gavela S., Hatzifoti C. Hatzifotis N, V. Kaselouri - Rigopoulou

Lab. of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str., 157 73 Athens

Kolias S.

Highway Engineering Lab., School of Civil Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str. 157 73 Athens

ABSTRACT: The present research deals with the study of the use of thermoplastic wastes as a part of the conventional aggregates in concrete. The polymer used was industrial waste from polypropylene. Sieve analysis, specific gravity and water absorption tests were performed at all types of aggregates (sand, gravel and polymer). Mixes containing polypropylene at percentages 0, 7, 12 and 20% by volume of aggregates were made. Flexural and compressive strength, dynamic and static modulus of elasticity as well as initial surface absorption were determined at various ages.

Keywords: concrete, aggregates, thermoplastic wastes

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ποσοστό των πλαστικών απορριμμάτων στο σύνολο των οικιακών απορριμμάτων είναι μεγάλο και συνεχώς αυξάνει. Σε κάθε χώρα η σύσταση των απορριμμάτων είναι διαφορετική, αφού αυτή επηρεάζεται από κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά, τα υπάρχοντα προγράμματα διαχείρισης απορριμμάτων κ.α., γενικά όμως η συμμετοχή των πλαστικών είναι μεγάλη. Την τελευταία δεκαετία γίνεται αξιοσημείωτη έρευνα στην αξιοποίηση διαφόρων ειδών απορριμμάτων ή βιομηχανικών παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως και έχει μεγάλο χρόνο ζωής, πράγμα που σημαίνει ότι τα απορρίμματα απομακρύνονται για μια μεγάλη χρονική περίοδο. Επειδή η ποσότητα των φυσικών αδρανών που απαιτείται για την κατασκευή του σκυροδέματος είναι μεγάλη, τα περιβαλλοντικά οφέλη δεν σχετίζονται μόνο με την ασφαλή διάθεση των απορριμμάτων αλλά και με την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την εξαγωγή των φυσικών αδρανών που οδηγεί στην καταστροφή του φυσικού τοπίου. Η χρήση των πλαστικών ως αδρανών στο σκυρόδεμα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να μην προκαλείται έκπτωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος.

Οι Al-Manaseer A.A. & Dalal T.R. (1997) χρησιμοποίησαν μηχανικά ανακυκλωμένους προφυλακτήρες αυτοκινήτων σε σκυρόδεμα και έδειξαν ότι αυτοί μπορούν να αντικαταστήσουν επιτυχώς ένα μέρος των συμβατικών αδρανών. Οι Ghaly A.M. & Gill M.S. (2004) κατέληξαν στα ίδια συμπεράσματα και επίσης προσπάθησαν να αναπτύξουν μια σχέση που συνδέει το ποσοστό του προστιθέμενου πολυμερούς με τη μείωση των θλιπτικών αντοχών ή του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος. Τα πολυμερή δεν αναπτύσσουν χημικούς δεσμούς με τον τσιμεντοπολτό και η συνάφειά τους δεν είναι τόσο καλή όσο αυτή των συμβατικών αδρανών. Βρέθηκε (Naik T.R. και Συνεργάτες 1996 & Soroushian P. και Συνεργάτες 1993) ότι η χημική κατεργασία υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) με διάλυμα HOC1 και NaOH ή με θείωση βελτιώνει την συνάφεια. Επίσης, αδρανή που κατασκευάστηκαν από τεμαχισμό ψυχθέντος τήγματος πλαστικών (μίγμα 85% πολυ(τερεφθαλικού αιθυλεστέρα) και 15% πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο) προτάθηκαν ως αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών για ελαφροσκυρόδεμα (Koide H. και Συνεργάτες 2002) με οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Άλλα εναλλακτικά αδρανή που έχουν εξεταστεί είναι ανακυκλωμένα λάστιχα αυτοκινήτων (Raghavan D. και Συνεργάτες 1998) και θερμοσκυρηνόμενα πολυμερή (Ziara M.M και Συνεργάτες 2002).

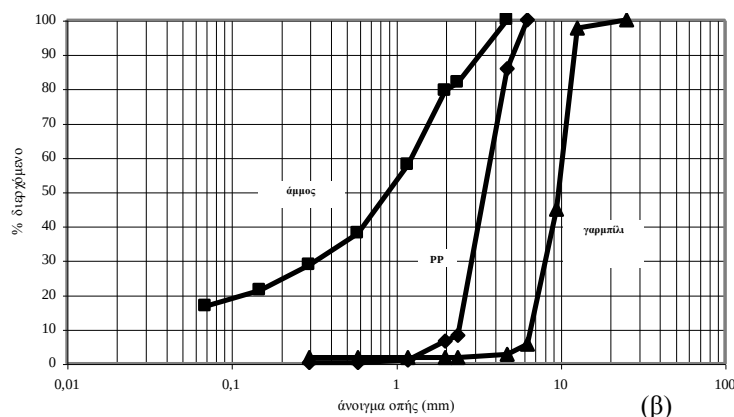
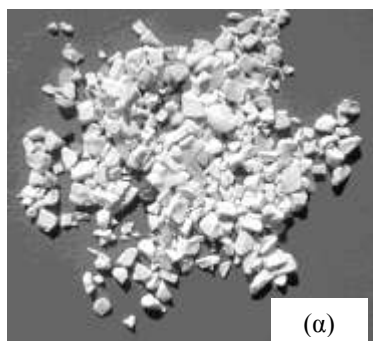
Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η αξιοποίηση των θερμοπλαστικών απορριμμάτων ως αδρανών στο σκυρόδεμα μελετώντας τις μηχανικές τους ιδιότητες, την επιφανειακή τους υδαταπορρόφηση, τον μηχανισμό θραύσης και την μορφολογία της διεπιφάνειας ανάμεσα στα πολυμερή και τον τσιμεντοπολτό.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τσιμέντο τύπου Π 42.5, ασβεστολιθικά θραυστά αδρανή (άμμος και γαρμπίλι), πολυπροπυλένιο (PP) που προέρχεται από μηχανική ανακύκλωση βιομηχανικών απορριμμάτων (Σχ. 1α) και νερό βρύσης. Σε όλα τα αδρανή (γαρμπίλι, άμμος και πολυμερές) έγινε κοκκομετρική ανάλυση και προσδιορισμός του ειδικού τους βάρους και της υδαταπορρόφησής τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 1β και στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Φυσικές ιδιότητες αδρανών.

Υλικό	πυκνότητα (kg/m ³)	υδαταπορρόφηση (%)
Γαρμπίλι	2680	0.92
Άμμος	2620	1.75
PP	1020	0.00



Σχήμα 1. (α) πολυπροπυλένιο που προέρχεται από μηχανική ανακύκλωση βιομηχανικών απορριμμάτων (β) κοκκομετρική διαβάθμιση των χρησιμοποιηθέντων αδρανών.

Παρασκευάστηκαν μίγματα που περιείχαν πολυπροπυλένιο σε ποσοστό 0%, 7%, 12% και 20% κατ' όγκον αδρανών με λόγο νερό προς τσιμέντο 0.6. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι αναλογίες των μιγμάτων.

Πίνακας 2. Αναλογίες μιγμάτων.

Συστατικό	Κατ' όγκον αντικατάσταση συμβατικών αδρανών (%)			
	0	7	12	20
Νερό (kg/m ³)	205	205	205	205
Τσιμέντο (kg/m ³)	350	350	350	350
Άμμος (kg/m ³)	876	754	666	526
Γαρμπίλι (kg/m ³)	896	896	896	896
PP (kg/m ³)	-	48	86	136

Από κάθε μίγμα κατασκευάστηκαν έξι πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 70mm×70mm×280mm, τρία κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 100mm×200mm. Έγινε προσδιορισμός της πυκνότητας νωπού σκυροδέματος για όλα τα μίγματα. Μετά από 24h από την κατασκευή τους τα δοκίμια ξεκαλουπώθηκαν και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο σταθερών συνθηκών θερμοκρασίας και υγρασίας (20°C και RH>95%). Μετά από παρέλευση 7 και 28 ημερών από την κατασκευή των πρισματικών δοκιμίων έγινε προσδιορισμός την αντοχής τους σε κάμψη και θλίψη (με την μέθοδο του ισοδύναμου κύβου) και του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$E_d = 4 \cdot 10^{-15} \cdot n^2 \cdot L^2 \cdot p \quad (1)$$

όπου n = η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού (Hz), L = το μήκος του δοκιμίου (m) και p = η πυκνότητα του δοκιμίου (kg/m³).

Η θεμελιώδης συχνότητα συντονισμού προσδιορίζεται με την μέθοδο που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C215-91. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας και οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης εξήχθηκαν από μετρήσεις στους τρεις κυλίνδρους 28 ημέρες από την παρασκευή τους.

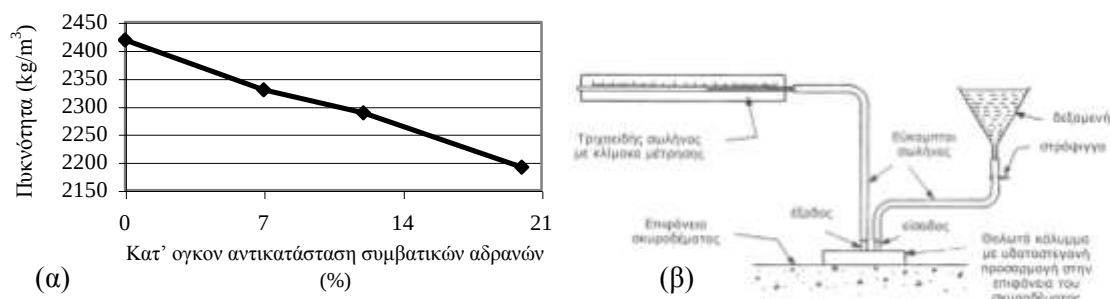
Ο ρυθμός επιφανειακής υδαταπορρόφησης προσδιορίστηκε από μετρήσεις στα τρία κυβικά δοκίμια 28 ημέρες από την παρασκευή τους. Επειδή η επιφάνεια όλων των δοκιμών πριν την δοκιμή πρέπει να βρίσκεται στην ίδια κατάσταση υγρασίας, τα δοκίμια τοποθετούνταν στους 60°C για 24h και αμέσως μετά ακολουθούσε η δοκιμή. Η διάταξη της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του ρυθμού της επιφανειακής υδαταπορρόφησης φαίνεται στο Σχήμα 2β. Ως ρυθμός επιφανειακής υδαταπορρόφησης στο σκυρόδεμα ορίζεται ο ρυθμός εισροής του νερού στο σκυρόδεμα ανά μονάδα επιφάνειας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από την έναρξη της δοκιμής σε συνθήκες σταθερής υδραυλικής πίεσης και θερμοκρασίας. Η συσκευή αποτελείται από ένα θολωτό κάλυμμα το οποίο προσαρμόζεται σταθερά στην επιφάνεια του δοκιμίου. Ένας λαστιχένιος δακτύλιος εξασφαλίζει την στεγανότητα. Σε ύψος 200mm από την επιφάνεια του δοκιμίου είναι προσαρμοσμένη μία δεξαμενή νερού που τροφοδοτεί το θολωτό κάλυμμα μέσω του σωλήνα εισόδου ο οποίος έχει μία στρόφιγγα που μπορεί να διακόπτει την παροχή. Ο σωλήνας εξόδου συνδέεται με ένα οριζόντιο τριχοειδή σωλήνα. Αφού τοποθετηθεί το θολωτό κάλυμμα στην επιφάνεια του δοκιμίου, η δεξαμενή τροφοδοτείται με νερό έως ότου ο θόλος και ο τριχοειδής σωλήνας πληρωθούν. Σε 10, 30 και 60min από την έναρξη της δοκιμής διακόπτεται διαδοχικά η παροχή του νερού με την στρόφιγγα. Η ποσότητα νερού που απορροφείται από την επιφάνεια του δοκιμίου ισοδυναμεί με την μετατόπιση του μηνίσκου στο τριχοειδή σωλήνα. Ο ρυθμός επιφανειακής απορρόφησης σε ml/(m²/s) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$f = \frac{60}{t} \cdot D \cdot 0.01 \quad (2)$$

όπου D = ο αριθμός των υποδιαιρέσεων του τριχοειδούς σωλήνα και t = ο χρόνος που κάνει ο μηνίσκος για να διανύσει την απόσταση D.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Πυκνότητα ναπού σκυροδέματος



Σχήμα 2. (α) Πυκνότητα ναπού σκυροδέματος, (β) διάταξη δοκιμής επιφανειακής υδαταπορρόφησης

Η πυκνότητα των μιγμάτων με 0, 7, 12 και 20% κ.ο. αδρανών φαίνεται στο Σχήμα 2α. Η πυκνότητα μειώνεται καθώς αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα. Αυτή η μείωση αποδίδεται στην μικρότερη πυκνότητα του πολυμερούς σε σχέση με αυτή των συμβατικών αδρανών.

Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα καθιστώντας το υλικό πιο όλκιμο, δηλαδή το δοκίμιο σκυροδέματος γίνεται περισσότερο παραμορφώσιμο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και αντοχή σε κάμψη και θλίψη

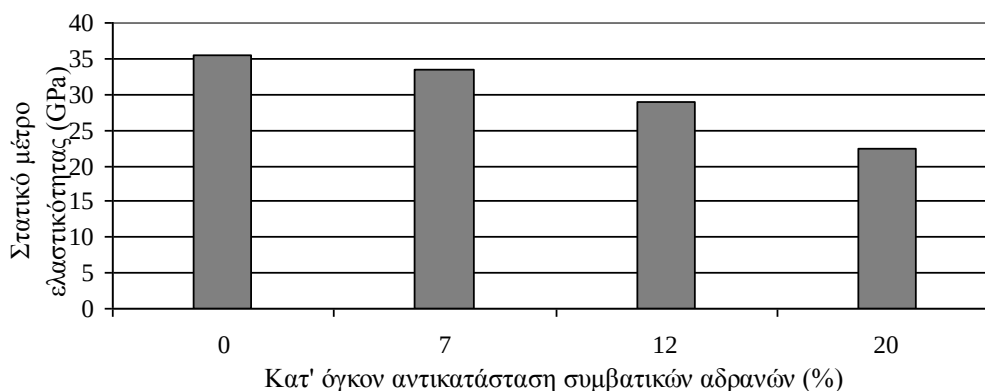
Κατ' όγκον αντικατάσταση συμβατικών αδρανών (%)	Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)		Αντοχή σε κάμψη (MPa)		Αντοχή σε θλίψη (MPa)	
	7 ημέρες	28 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες
0	39.50	42.07	5.20	5.40	38.20	45.36
7	36.58	38.97	4.43	4.89	35.34	42.60
12	32.74	34.30	3.93	4.54	32.71	37.49
20	27.19	29.74	3.87	3.94	28.53	34.10

Αντοχή σε κάμψη και θλίψη

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε θλίψη και κάμψη παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Υπάρχει μια μείωση της αντοχής σε θλίψη και κάμψη όταν αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα. Η μείωση της αντοχής αποδίδεται αφενός στην μικρότερη αντοχή του πολυμερούς σε σχέση με αυτή των συμβατικών αδρανών και αφετέρου στην σχετικά ασθενέστερη συνάφεια μεταξύ του πολυμερούς και του τσιμεντοπολτού από ότι αυτή των συμβατικών αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Η μείωση της αντοχής δεν είναι κατ' ανάγκη πρόβλημα γιατί συνδυάζεται και με μείωση του μέτρου ελαστικότητας το οποίο σημαίνει και μείωση των αναπτυσσόμενων τάσεων. Η κρισιμότητα μιας εντατικής κατάστασης εξαρτάται από το περιθώριο αντοχής που υπάρχει, δηλαδή από τη διαφορά αντοχής – αναπτυσσόμενης τάσης. Όταν η διαφορά αυτή τείνει να μηδενιστεί (η αναπτυσσόμενη τάση προσεγγίζει σε τιμή την αντοχή), τότε η κατάσταση είναι κρίσιμη με αποτέλεσμα την θραύση της κατασκευής.

Στατικό μέτρο ελαστικότητας

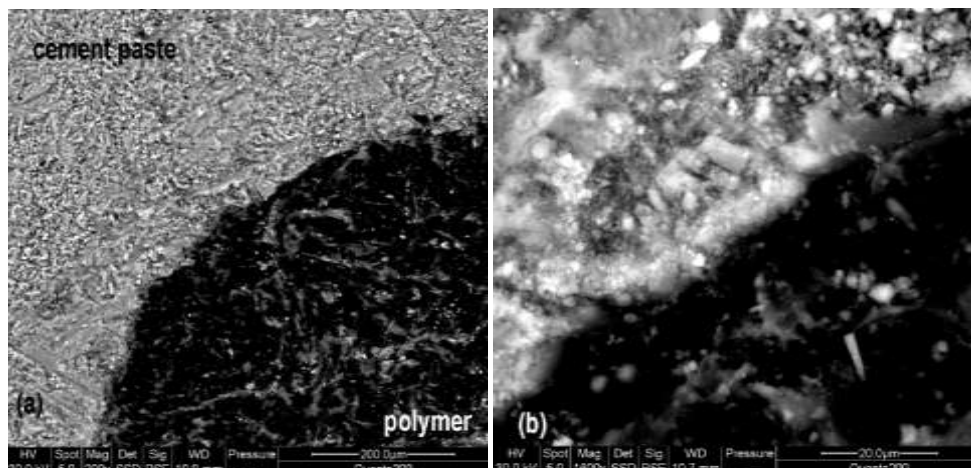
Το στατικό μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος που περιέχει 0, 7, 12 και 20% πολυμερές παρουσιάζεται στο Σχήμα 3. Το στατικό μέτρο ελαστικότητας μειώνεται καθώς το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα αυξάνει. Κυμαίνεται από 35.52GPa για το μίγμα αναφοράς (0% PP) μέχρι 22.46GPa για το μίγμα που περιέχει 20% κ.ο. αδρανών PP. Η μείωση αυτή οφείλεται στο ότι το πολυμερές που προστίθεται έχει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από τα συμβατικά αδρανή. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο λόγος στατικού μέτρου ελαστικότητας προς δυναμικό μέτρο ελαστικότητας είναι μικρότερος της μονάδας για όλα τα ποσοστά αντικατάστασης συμβατικών αδρανών.



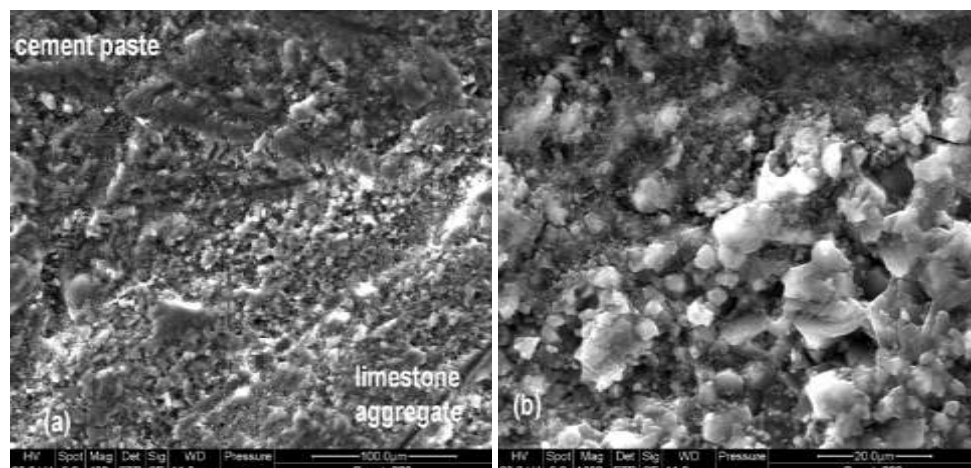
Σχήμα 3. Στατικό μέτρο ελαστικότητας

Μελέτη της διεπιφάνειας ανάμεσα στα πλαστικά αδρανή και τον τσιμεντοπολτό

Η συνάφεια ανάμεσα στα πολυμερή και τον τσιμεντοπολτό αναμένεται να είναι ασθενέστερη από αυτή ανάμεσα στα συμβατικά αδρανή και τον τσιμεντοπολτό. Και αυτό εξαιτίας του γεγονότος ότι καλύτερη συνάφεια συνήθως επιτυγχάνεται με τραχύτερες επιφάνειες αδρανών και με πορώδη αδρανή. Δοκίμια από όλα τα μίγματα και στις δύο ηλικίες (7 και 28 ημέρες) εξετάστηκαν συστηματικά με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM). Παρατηρήθηκε ότι η διεπιφάνεια ανάμεσα στα πολυμερή και τον τσιμεντοπολτό είναι αρκετά πυκνή, χωρίς μικρορωγμές και με μια σχετικά καλή συνάφεια. Μία τυπική μικροδομή μιας τέτοιας διεπιφάνειας παρουσιάζεται στην μικροφωτογραφία του Σχήματος 4, ενός δείγματος ηλικίας 28 ημερών. Για σύγκριση, μια τυπική μικροφωτογραφία SEM διεπιφάνειας ανάμεσα σε συμβατικό αδρανές και τσιμεντοπολτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.



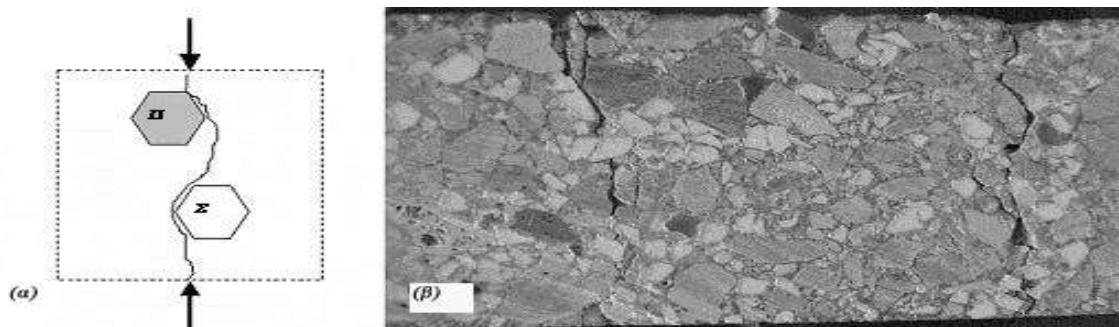
Σχήμα 4. Μικροφωτογραφίες SEM της διεπιφάνειας ανάμεσα σε πλαστικό αδρανές και τσιμεντοπολτό (a) x200, (b) x1600.



Σχήμα 5. Μικροφωτογραφίες SEM της διεπιφάνειας ανάμεσα σε συμβατικό αδρανές και τσιμεντοπολτό (a) x400, (b) x1600.

Μηχανισμός θραύσης

Η παρατήρηση των τομών των δοκιμίων που υπέστησαν δοκιμή αντοχής σε θλίψη έδειξε ότι οι ρωγμές δεν διέρχονται δια μέσου του πολυμερούς αλλά περνούν από την διεπιφάνεια του πολυμερούς και του τσιμεντοπολτού όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. (α) Μοντέλο μηχανισμού θραύσης (με Π συμβολίζεται το πολυμερές και με Σ το συμβατικό αδρανές), (β) τομή δοκιμίου μετά από δοκιμή αντοχής σε θλίψη.

Επιφανειακή υδαταπορρόφηση

Τα αποτελέσματα της δοκιμής επιφανειακής υδαταπορρόφησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Προσδιορίστηκε ο ρυθμός επιφανειακής απορρόφησης 10, 30 και 60min από την έναρξη της δοκιμής (f_{10} , f_{30} , f_{60}). Παρατηρείται μία ένδειξη αύξησης του ρυθμού επιφανειακής υδαταπορρόφησης καθώς αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα και αυτό αποδίδεται στη σχετικά μειωμένη συνάφεια του τσιμεντοπολτού με το πολυμερές. Επίσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η διάρκεια της μέτρησης ο ρυθμός απορρόφησης ελαττώνεται, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο, αφού τα διάκενα του υλικού πληρώνονται από τα μόρια του νερού.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα δοκιμής επιφανειακής υδαταπορρόφησης (28 ημέρες)

Κατ' ογκον αντικατάσταση συμβατικών αδρανών (%)	f_{10} (ml/(m ² /s))	f_{30} (ml/(m ² /s))	f_{60} (ml/(m ² /s))
0	0.138	0.083	0.061
7	0.226	0.135	0.097
12	0.310	0.168	0.121
20	0.284	0.193	0.155

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντικατάσταση μέρους των συμβατικών αδρανών από το εξετασθέν πολυμερές έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας του σκυροδέματος και τη μείωση του δυναμικού και στατικού μέτρου ελαστικότητας. Η μείωση αυτή αποδίδεται στις διαφορετικές ιδιότητες του πολυμερούς σε σχέση με τα συμβατικά αδρανή. Παρατηρείται μικρή μείωση των αντοχών που αποδίδεται στην μικρότερη αντοχή του πολυμερούς και στην μικρότερη συνάφειά του με τον τσιμεντοπολτό. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το υλικό είναι πιο παραμορφώσιμο η μείωση της αντοχής δεν είναι κατ' ανάγκη πρόβλημα. Τέλος παρατηρείται ένδειξη αύξησης του ρυθμού επιφανειακής απορρόφησης καθώς αυξάνει το ποσοστό του πολυμερούς στο μίγμα. Η μελέτη με Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης έδειξε ότι η δομή της διεπιφάνειας τσιμεντοπολτού – πολυμερούς είναι λιγότερο συμπαγής σε σχέση με τη διεπιφάνεια τσιμεντοπολτού – συμβατικού αδρανούς, αλλά παρουσιάζει εικόνα σχετικά καλής συνάφειας με έλλειψη μικρορωγμών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες απευθύνονται: Στην εταιρία ΑΓΕΤ Ηρακλής για την προμήθεια του τσιμέντου, στα λατομεία ΧΑΛΥΨ για την προμήθεια των ασβεστολιθικών αδρανών, την βιομηχανία πλαστικών «Παβιπλαστ» (Πάτρα) για την προμήθεια του πολυμερούς και στο εργαστήριο της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος όπου έγιναν οι μηχανικές δοκιμές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Al-Manaseer A.A. & Dalal T.R. 1997. Concrete containing plastic aggregates. *Concrete International*. Vol 19 (8): 47-52.
2. Ghaly A.M. & Gill M.S. 2004. Compression and deformation performance of concrete containing postconsumer plastics. *Journal of materials in civil engineering*. Vol 16 (4): 289-296.
3. Koide H., Tomon M., Sasaki T. 2002. Investigation of the use of waste plastic as an aggregate for lightweight concrete. *Sustainable concrete construction, Proceedings of the international conference held at Dundee, UK*: 177-185.
4. Naik T.R., Singh S.S., Huber C.O., Brodersen B.S. 1996. Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites. *Cement and concrete research*. Vol 26 (10): 1489-1492.
5. Raghavan D., Huynh H., Ferraris C. F. 1998. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber – filled cementitious composite. *Journal of materials science*. Vol 33: 1745-1752.
6. Soroushian P., Alhozaimy A., Eldarwish A.I. 1993. Recycling of plastics in concrete to enhance toughness characteristics and resistance to shrinkage cracking. *Proceedings of the symposium on recovery and effective reuse of discarded materials and by-products for construction of highway facilities*. Colorado: 5.41-5.53.
7. Ziara M.M., Dweik H.S., Hadidoun M.S. 2002. Engineering properties of concrete made with ground melamine – formaldehyde thermosetting plastics as sand replacement. *Proceedings of the 6th international conference on concrete technology for developing countries*. Jordan: 233-242.

ΜΕΛΕΤΗ ΜΙΚΡΟΔΟΜΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΦΘΑΡΜΕΝΑ ΕΛΑΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ

Ν.Οικονόμου, Μ. Στεφανίδου, Σ. Μαυρίδου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

Π. Εσκίογλου

Εργαστήριο Μηχανικών Επιστημών και Τοπογραφίας, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία παρατίθενται τα αποτελέσματα δοκιμαστικών συνθέσεων τσιμεντοκονιαμάτων με προσθήκη δυο πηγών κονιοποιημένου φθαρμένου ελαστικού -ελληνικό και γερμανικό-. Μελετήθηκαν διάφορες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των τσιμεντοκονιαμάτων αυτών ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε μικροσκοπική μελέτη της δομής τους, με σκοπό την παρατήρηση της συνάφειας του ελαστικού με την κονία. Από τα αποτελέσματα προκύπτει πως είναι απαραίτητη η εύρεση τρόπου βελτίωσης της συνάφειας μεταξύ των κόκκων του φθαρμένου ελαστικού και τσιμεντόπαστας. Επίσης, παρά την αναμενόμενη πτώση των μηχανικών αντοχών, παρατηρήθηκε μείωση του ενεργού πορώδους και της τριχοειδούς απορρόφησης.

Λέξεις κλειδιά: ανακύκλωση, φθαρμένα ελαστικά αυτοκινήτων, τσιμεντοκονιάματα, μικροδομή

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE OF MORTARS MODIFIED WITH RUBBER FROM WORN AUTOMOBILE TIRES

N. Oikonomou., M. Stefanidou, S. Mavridou

Laboratory of Building Materials, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki

P. Escioglou

Laboratory of Mechanical Sciences and Topography, Department of Forestry and Physical Environment, Aristotle University of Thessaloniki

ABSTRACT: This paper presents the results from laboratory tests of rubberized mortars. Two sources of worn automobile tires have been used -Greek and German-. Several physical and mechanical properties of these mortars have been studied, while at the same time a study of their microstructure took place in order to observe the bonding between rubber and mortar. Results certify that it is necessary to improve the bonding between worn tire particles and cement paste. Despite the loss in mechanical properties, open porosity and capillarity were improved.

Keywords: recycling, worn automobile tires, cement mortars, microstructure

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σημαντικό θέμα της απόθεσης των φθαρμένων ελαστικών αυτοκινήτων αποκτά ιδιαίτερη σημασία και για την χώρα μας (Ελλάδα) μετά την πρόσφατη θεσμοθέτηση του υπ' αριθμόν 109/75/2004 Προεδρικού Διατάγματος σχετικά με τα μέτρα και τους όρους για την εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών των οχημάτων. Σύμφωνα με αυτό η εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών διέπεται από τις γενικές αρχές εναλλακτικής διαχείρισης του άρθρου 4 του Ν2939/2001. Επίσης σύμφωνα με το άρθρο 6 της 29407/3508/2002 ΚΥΑ «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων» μετά την 16^η Ιουλίου 2003, δεν γίνονται αποδεκτά σε ΧΥΤΑ : i) ολόκληρα μεταχειρισμένα ελαστικά οχημάτων, εκτός από τα υλικά που προορίζονται για χρήση σε κατασκευαστικά έργα εντός του ΧΥΤΑ, και ii) τεμαχισμένα μεταχειρισμένα ελαστικά οχημάτων μετά την 16^η Ιουλίου 2006. Ταυτόχρονα έως την 31^η Ιουλίου 2006, η αξιοποίηση των μεταχειρισμένων αποβλήτων ελαστικών οχημάτων πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον το 65% των αποσυρόμενων ελαστικών. Εντός του ίδιου χρονικού ορίου, η ανακύκλωση πρέπει να φτάνει τουλάχιστον στο 10%. Επομένως κρίνεται επιτακτική η άμεση διαχείριση των ελαστικών αυτών (Προεδρικό Διάταγμα υπ' αριθμ.109, 2004). Οι παραγωγοί ελαστικών και οι θυγατρικές τους εταιρίες ανακύκλωσης, ερευνητικά κέντρα, εταιρίες ανακύκλωσης ελαστικού και οι παραγωγοί εξοπλισμού έχουν πραγματοποιήσει μεγάλη πρόοδο στην εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τις πιθανές χρήσεις των ελαστικών οχημάτων μετά το πέρας της χρήσης τους, αλλά και τις οικολογικές επιπτώσεις των προτεινόμενων εφαρμογών (Ε.Τ.Ρ.Α., 2004).

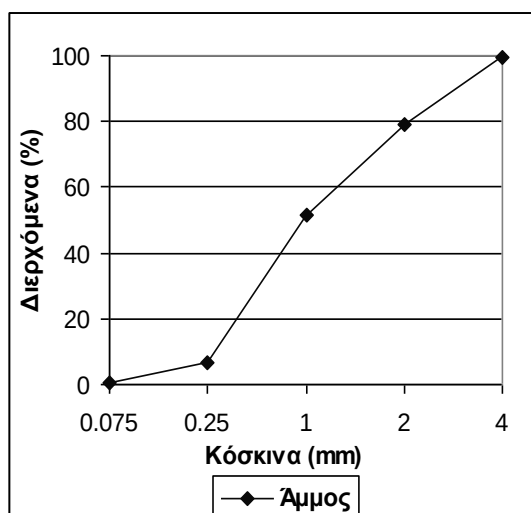
Η παρούσα εργασία μελετά ορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τσιμεντοκονιαμάτων με χρήση κονιοποιημένου φθαρμένου ελαστικού αυτοκινήτων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην μελέτη της μικροδομής των τροποποιημένων με ελαστικά τσιμεντοκονιαμάτων, προκειμένου να ευρεθεί η συνάφεια μεταξύ του ελαστικού και της κονιάς. Το ελαστικό προέρχεται από δυο πηγές (ελληνικό και γερμανικό). Κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν αυτές οι δυο πηγές για τον έλεγχο καταλληλότητας της ποιότητας αυτών ως πρόσθετα σε προϊόντα τσιμέντου λόγω της διαφορετικής τεχνολογίας παραγωγής τους και να συγκριθούν τα αποτελέσματα των προϊόντων αυτών. Το ποσοστό της αντικατάστασης του αδρανούς (άμμου) από ελαστικό είναι 2.5%, δεδομένου ότι σε προηγούμενη εργασία αυτό το ποσοστό κρίθηκε το πλέον κατάλληλο, όσον αφορά στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των μελετούμενων τσιμεντοκονιαμάτων (Οικονόμου Ν., 2005). Επίσης η κοκκομετρία του ελαστικού επιλέχθηκε με βάση τη βιβλιογραφία σύμφωνα με την οποία μεγαλύτερης κοκκομετρίας ελαστικά επιφέρουν σημαντική μείωση των μηχανικών αντοχών των τσιμεντοκονιαμάτων (Ali, N.A., 1993- Eldin, N.N., 1993- Khatib Z.K., 1999- Rostami, H., 1993 - Siddique Rafat , 2004- Topcu, I.B., 1995 -Turatsinze A., 2005,).

Τροποποιημένα με ελαστικά προϊόντα τσιμέντου είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου κυρίαρχο ρόλο δεν παίζουν οι μηχανικές αντοχές τους, όπως σε στηθαία αναχαίτισης αυτοκινήτων (Topcu, I.B., 1995) -τα οποία υπόκεινται σε άμεσες επιπτώσεις κρούσης, σε ηχοπετάσματα, στην παραγωγή κυβόλιθων, πλακών πεζοδρομίου, πλακιδίων δαπέδου, αντικραδασμικών βάσεων κ.τ.λ. (Κανακόπουλος Δ., 2005).

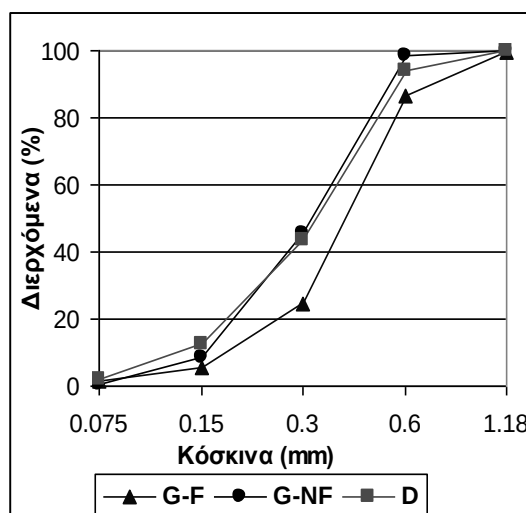
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων στην παρούσα μελέτη ήταν τσιμέντο, άμμος ποταμού Αξιού (μετά από ξήρανσή της σε ξηραντήριο στους 105 °C) και πούδρα κονιοποιημένου φθαρμένου ελαστικού αυτοκινήτων. Έγινε χρήση υψηλής αντοχής τσιμέντου (CEM I- 42.5 N) της εταιρείας TITAN A.E.

Η πούδρα των ελαστικών είχε προέλευση από Ελλάδα¹ και από Γερμανία². Οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις του αδρανούς υλικού (άμμος ποταμού) και των δύο τύπων ελαστικού (G & D) φαίνονται στα σχήματα 1 και 2, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί πως η πούδρα ελαστικού ελληνικής προέλευσης περιείχε μικρό ποσοστό(3-5%) υφασμάτων ινών 0,3-0,6mm. Κρίθηκε σκόπιμη η παρασκευή τσιμεντοκονιαμάτων και με ελαστικό που περιείχε υφασμάτινες ίνες (G-F) καθώς και με ελαστικό χωρίς ίνες (G-NF) προκειμένου να μελετηθεί η πιθανή επιρροή των υφασμάτων ινών στις μελετούμενες ιδιότητες των τσιμεντοκονιαμάτων



Σχήμα 1: Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου



Σχήμα 2 : Κοκκομετρική διαβάθμιση ελληνικού (G-F, G-NF) και γερμανικού (D) ελαστικού

Για το κονίαμα αναφοράς A, (όπως φαίνεται στον πίνακα 1) χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο, άμμος και νερό χωρίς φθαρμένο ελαστικό αυτοκινήτων. Για την παρασκευή όλων των υπολοίπων συνθέσεων μεταβλήθηκαν οι ποσότητες της άμμου και του ελαστικού καθώς έγινε αντικατάσταση μέρους της άμμου -σε ποσοστό 2.5%- από πούδρα φθαρμένου ελαστικού αυτοκινήτων. Για όλες τις συνθέσεις ο λόγος νερού προς τσιμέντο ήταν 0.5 και η εργασιμότητα του τσιμεντοκονιάματος 11 ± 1 cm. Οι συνθέσεις των τροποποιημένων τσιμεντοκονιαμάτων με ελαστικά φαίνονται στον πίνακα 1.

Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν είχαν διαστάσεις 4x4x16cm, τοποθετήθηκαν σε τρίδυμες μεταλλικές μήτρες και συντηρήθηκαν σε ειδικό θάλαμο με σταθερές συνθήκες θερμοκρασίας ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) και υγρασίας (>95%). Στα δοκίμια έγιναν έλεγχοι προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, όπως η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή από κάμψη καθώς και το ενεργό πορώδες, η τριχοειδής απορρόφηση και μελέτη της μικροδομής τους με χρήση Σαρωτικού Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου (SEM).

¹ Καραμπάς Ελληνική Αντιρρυπαντική Ανακύκλωσης Α.Ε.Β.Ε., 35007 Λιβανάτες Φθιώτιδος, e-mail: kkarabas@otenet.gr

² RTW, Rubber Technology Weidmann, GmbH & Co, Bindlacher Straße 4, 95448 Bayreuth, Germany, www.weidmann.de/RTW

Πίνακας 1 : Συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων με και χωρίς φθαρμένα ελαστικά αυτοκινήτων

Αναλογίες*	Κωδ.συνθέσεων			
	A	G-F	G-NF	D
Τσιμέντο CEM I 42.5N	1	1	1	1
Άμμος ποταμού (0-4mm)	3	2.925	2.925	2.925
Ελληνικό ελαστικό χωρίς ίνες(0-1.18mm)			0.075	
Ελληνικό ελαστικό με ίνες (0-1.18mm)		0.075		
Γερμανικό ελαστικό (0-1.18mm)				0.075
Νερό	0.5	0.5	0.5	0.5
Εξάπλωση, cm	11.6	10.3	10.4	10.5

Επεξήγηση συμβόλων Πίνακα 1

G : ελληνικό ελαστικό

D : γερμανικό ελαστικό

A: πρότυπη σύνθεση

F/ NF : με / χωρίς ίνες

*: όλες οι αναλογίες σε μέρη βάρους, μ.β.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Ιδιότητες νωπού τσιμεντοκονιάματος

- Εργασιμότητα

Κατά την παρασκευή των δοκιμών των τσιμεντοκονιαμάτων παρατηρήθηκε πτώση της εργασιμότητας με προσθήκη πούδρας ελαστικού, όπως φαίνεται στον πίνακα 1. Επίσης μεγαλύτερη πτώση της εργασιμότητας παρατηρήθηκε στη σύνθεση G-F, που οφειλόταν στην ύπαρξη ποσοστού υφασμάτων ινών στην ελληνικής προέλευσης πούδρα ελαστικού. Η παρατηρούμενη μείωση ήταν αναμενόμενη και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [Khatib Z.K., Bayomy, F.M., 1999- Siddique Rafat, Naik R T., 2004).

- Συμπύκνωση

Κατά την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων επιλέχθηκαν δυο τρόποι συμπύκνωσής τους, ένας με χρήση μεταλλικής ράβδου και ένας δεύτερος με χρήση δονητικής τράπεζας 60 χτύπων. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε πως τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν με τη δονητική τράπεζα των 60 χτύπων παρουσίασαν αυξημένες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα αντίστοιχα που συμπυκνώθηκαν με μεταλλική ράβδο καθώς και μειωμένο ενεργό πορώδες και τριχοειδή απορρόφηση. Η βελτίωση των μηχανικών αντοχών, με συμπύκνωση σε τράπεζα 60 χτύπων, ανήλθε σε 38% ενώ η μείωση του πορώδους έφτασε το 50 %.

Ιδιότητες σκληρυμένου τσιμεντοκονιάματος

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μηχανικών χαρακτηριστικών και του πορώδους των τροποποιημένων τσιμεντοκονιαμάτων με και χωρίς την προσθήκη των δύο τύπων πούδρας φθαρμένων ελαστικών αυτοκινήτων. Τα αποτελέσματα αυτά προέρχονται από δοκίμια με την καλύτερη συμπίκνωση, δηλαδή σε δονούμενη τράπεζα 60 χτύπων.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά μηχανικών αντοχών και πορώδους των τσιμεντοκονιαμάτων

Χαρακτηριστικά	Συνθέσεις			
	A	G-F	G-NF	D
Θλιπτική αντοχή (MPa)	39.57	32.39	34.26	33.44
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	7.25	6.25	6.60	6.40
Ενεργό Πορώδες (%)	8.77	8.20	7.41	8.01

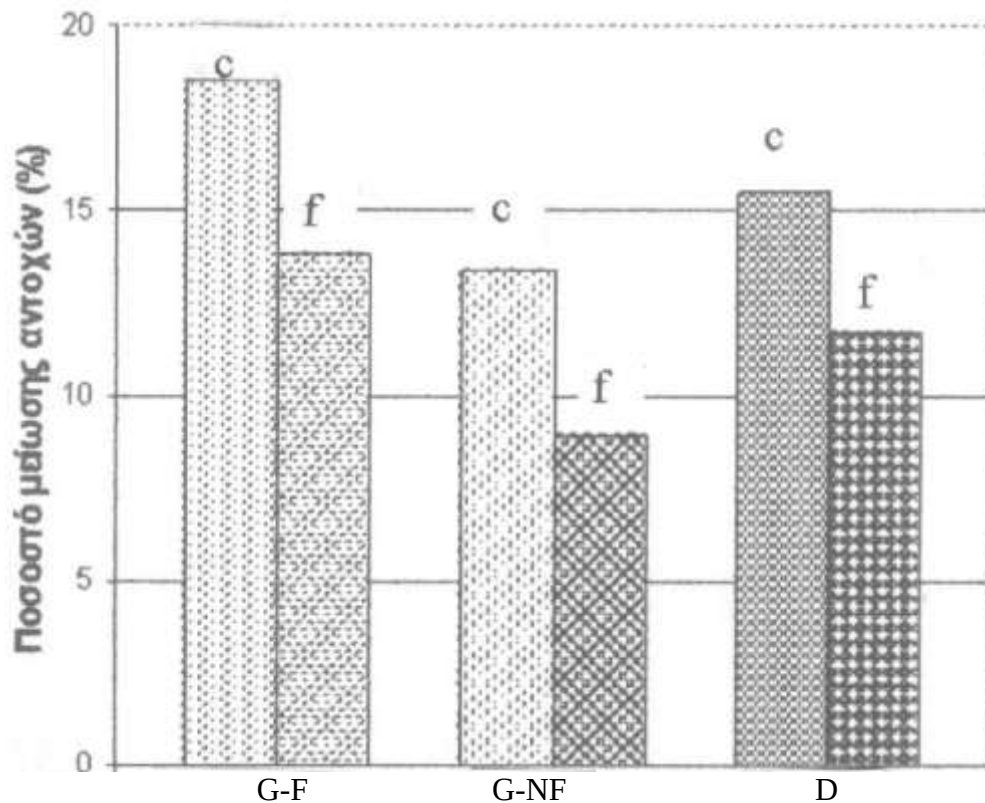
- Θλιπτική αντοχή

Προσθήκη φθαρμένων ελαστικών αυτοκινήτων, σε διάφορα ποσοστά και κοκκομετρίες, επιφέρει μείωση των μηχανικών αντοχών των προϊόντων τσιμέντου στα οποία προστίθενται, σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία (Ali, N.A., 1993- Eldin, N.N., 1993- Khatib Z.K., 1999- Rostami, H.,1993 - Siddique Rafat, 2004- Turatsinze A.,2005). Όσον αφορά στις συγκεκριμένες συνθέσεις της παρούσας εργασίας και για προσθήκη κονιοποιημένου φθαρμένου ελαστικού αυτοκινήτων σε ποσοστό 2.5%, ως αντικατάστατο μέρους του αδρανούς (της άμμου), μικρότερη μείωση της θλιπτικής αντοχής παρουσίασε η σύνθεση G-NF, η οποία ήταν της τάξης του 13.42%, ενώ μεγαλύτερη μείωση η σύνθεση G-F, η οποία περιείχε φθαρμένο ελαστικό αυτοκινήτων με υφασμάτινες ίνες, μείωση της τάξης του 18.15%, σε σχέση με την πρότυπη σύνθεση Α. Η σύνθεση με το γερμανικής προέλευσης ελαστικό παρουσίασε ενδιάμεση συμπεριφορά, δηλαδή η πτώση της θλιπτικής αντοχής έφτασε το 15.5%, σε σχέση με τη σύνθεση Α.

- Εφελκυστική αντοχή από κάμψη

Παρόμοια συμπεριφορά σημειώθηκε στην εφελκυστική αντοχή από κάμψη των υπό μελέτη τσιμεντοκονιαμάτων. Ωστόσο η μείωση του έμμεσου εφελκυσμού ήταν μικρότερη από την αντίστοιχη της θλιπτικής αντοχής. Η μείωση ήταν μεγαλύτερη για τη σύνθεση με κωδικό G-F 13.8%, και μικρότερη για την σύνθεση G-NF 8.97%, συγκρινόμενη με την αντίστοιχη της πρότυπης σύνθεσης με κωδικό Α. Η σύνθεση D παρουσίασε μειωμένη εφελκυστική αντοχή της τάξης του 11.7%, σε σχέση με την πρότυπη σύνθεση, Α .

Στο σχήμα 3 φαίνονται συγκεντρωτικά τα ποσοστά μείωσης των μηχανικών αντοχών των τσιμεντοκονιαμάτων με φθαρμένο ελαστικό σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές αντοχών της πρότυπης σύνθεσης Α.



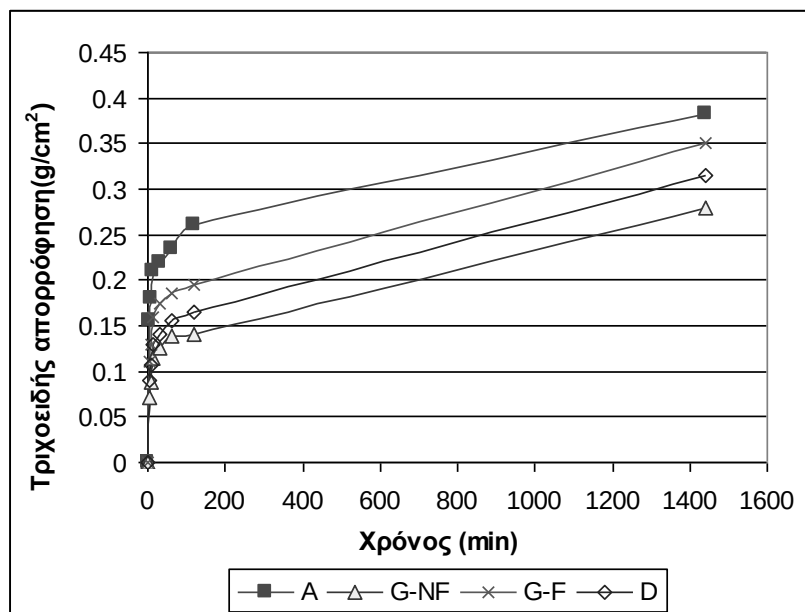
Σχήμα 3: Μείωση της θλιπτικής (c) και της εφελκυστικής (f) αντοχής των τσιμεντοκονιαμάτων των διαφόρων συνθέσεων με φθαρμένο ελαστικό σε σχέση με τις αντίστοιχες της πρότυπης σύνθεσης Α.

- Ενεργό πορώδες

Το ενεργό πορώδες αποτελεί μια ιδιότητα, η οποία βελτιώνεται με τη χρήση φθαρμένου ελαστικού αυτοκινήτων. Με βάση τις συνθέσεις της παρούσας μελέτης καλύτερη συμπεριφορά σημειώθηκε στη σύνθεση G-NF, της οποίας το ενεργό πορώδες ήταν μικρότερο του αντίστοιχου της πρότυπης σύνθεσης Α κατά 15.5%. Αμέσως καλύτερα αποτελέσματα έδωσε η σύνθεση D με ποσοστό μείωσης του ενεργού πορώδους κατά 8.66% σε σχέση με την Α ενώ το πορώδες της σύνθεσης με χρήση ελληνικής προέλευσης ελαστικού με υφασμάτινες ίνες G-F ήταν μικρότερο του πορώδους της Α κατά 6.5%.

- Τριχοειδής απορρόφηση

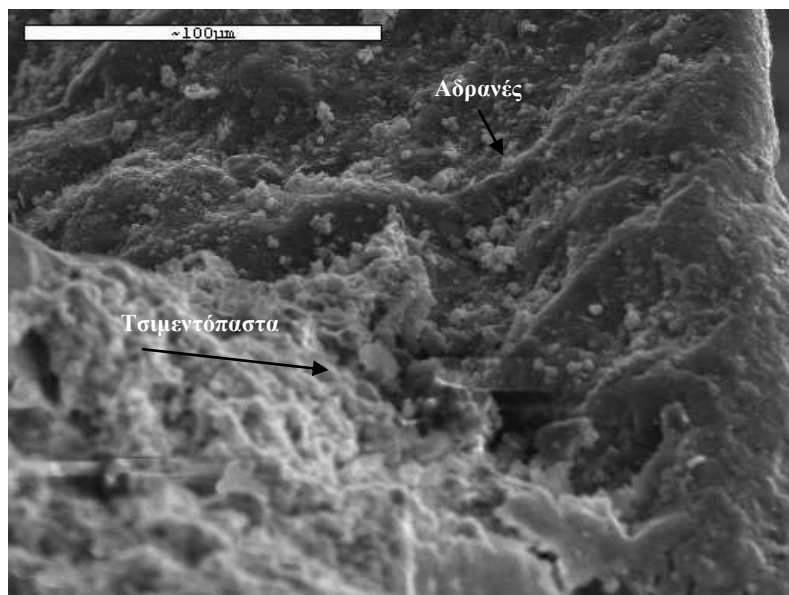
Σκοπός της συγκεκριμένης δοκιμής αποτέλεσε ο υπολογισμός της ποσότητας του νερού που προσροφάται μέσω τριχοειδών κενών σε κάθε δοκίμιο τσιμεντοκονιάματος. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στο σχήμα 3. Με βάση το σχήμα αυτό παρατηρούμε πως μικρότερη τριχοειδής απορρόφηση εμφανίστηκε στα δοκίμια της σύνθεσης G-NF, αμέσως μεγαλύτερη στα δοκίμια της σύνθεσης με προσθήκη ελαστικού γερμανικής προέλευσης -D- και ακόμα μεγαλύτερη στα δοκίμια της σύνθεσης G-F, σε σχέση με τα δοκίμια της πρότυπης σύνθεσης αναφοράς Α. Το ποσοστό μείωσης της τριχοειδούς απορρόφησης έφτασε το 11.43, 17.4, και 28.8% για τις συνθέσεις D, G-F και G-NF αντίστοιχα στις 24 ώρες.



Σχήμα 4 : Τριοξειδής απορρόφηση των διαφόρων συνθέσεων των τροποποιημένων τσιμεντοκονιαμάτων με πούδρα φθαρμένου ελαστικού αυτοκινήτων

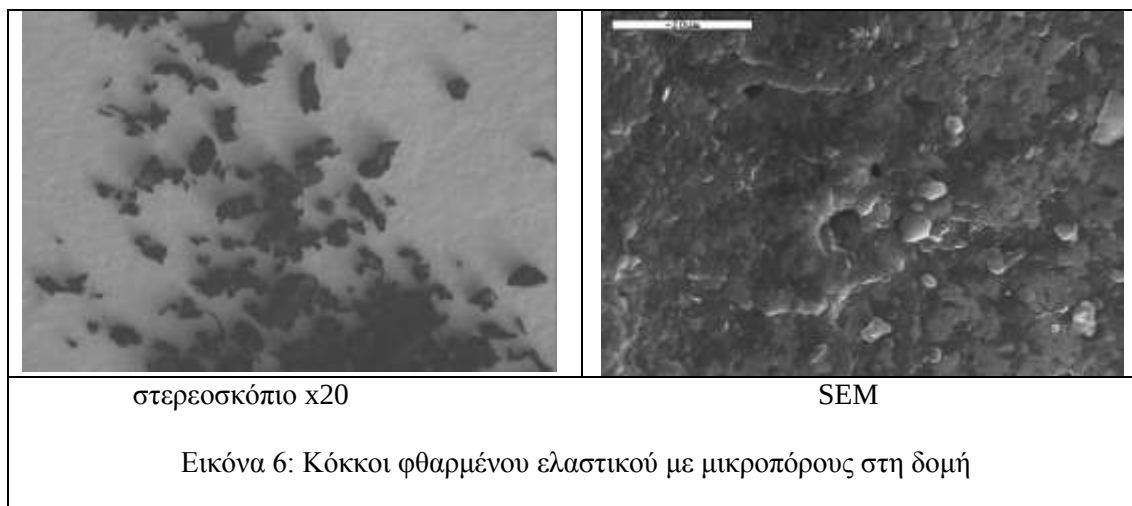
- Μελέτη μικροδομής

Μέρος της εργασίας αποτέλεσε η μελέτη των κόκκων κονιοποιημένου φθαρμένου ελαστικού αυτοκινήτων στη μικροδομή των τσιμεντοκονιαμάτων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε ειδικές εφαρμογές. Η άμμος Αξιού είναι φυσικής προέλευσης και πυριτικής κατά βάση σύστασης (χαλαζιοαστριούχα πετρώματα). Η επιφάνειά των κόκκων της είναι ελαφρώς τραχειά και οι επαφές τους με την πάστα είναι ισχυρές (εικόνα 5).

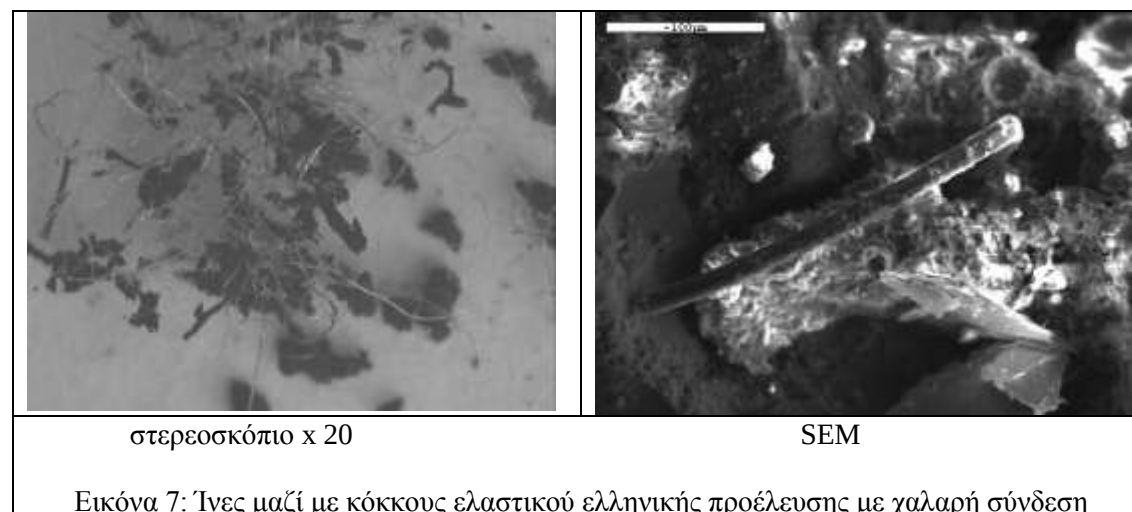


Εικόνα 5: Ισχυρή επαφή τσιμεντόπαστας με φυσικό αδρανές(κονίαμα αναφοράς)

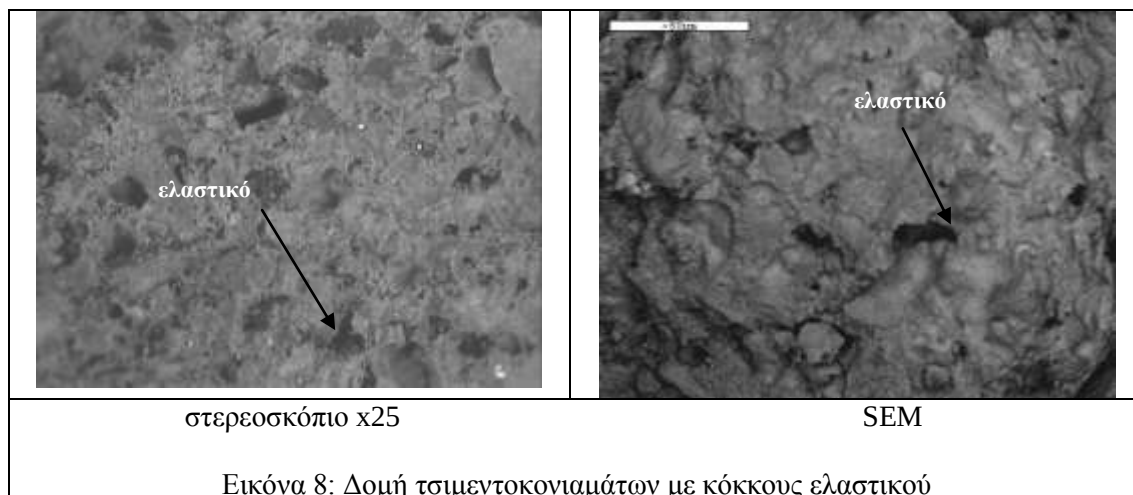
Οι κόκκοι τόσο του ελληνικής όσο και του γερμανικής προέλευσης ελαστικού, όπως φαίνεται από στερεοσκοπική μελέτη και από ανάλυση με σαρωτικό μικροσκόπιο, έχουν τυχαίο, ακανόνιστο σχήμα ενώ η επιφάνειά τους δεν είναι τελείως λεία. Χαρακτηριστικό είναι ότι έχουν ένα μικρό ποσοστό πόρων διαμέτρου 1,5-2μm (εικόνα 6).



Το ελληνικό δείγμα περιέχει ένα ποσοστό υφασμάτων ινών που η σκαναρισμένη ανάλυση με το σαρωτικό μικροσκόπιο έδειξε ότι πρόκειται για ανθρακονήματα. Οι ίνες αυτές ενώ φαίνονται να συνδέονται με τους κόκκους, λεπτομερής ανάλυση δείχνει ότι μετά την κατεργασία που έχουν υποστεί ένα μικρό μόνο ποσοστό έχει ισχυρή σύνδεση ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό εύκολα διαχωρίζεται και μπορεί να απομακρυνθεί (εικόνα 7). Αυτό αποδεικνύεται και με απομάκρυνση των ινών με απλό κοσκίνισμα.

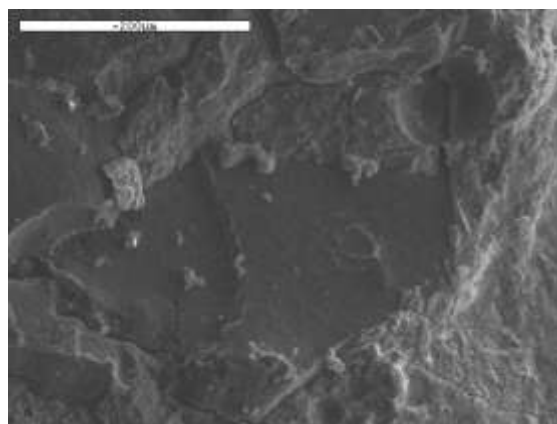


Η παρουσία των κόκκων του φθαρμένου ελαστικού στη δομή των τσιμεντοκονιαμάτων (Εικόνα 8) είναι αισθητή με προσεκτική μόνο παρατήρηση εξαιτίας του μικρού τους ποσοστού και της συγκεκριμένης κοκκομετρικής τους διαβάθμισης.



Η μακρο-δομή του πρότυπου κονιάματος ελάχιστα τροποποιείται με την προσθήκη του ελαστικού αφού τόσο η μορφή όσο και το ποσοστό των μεγάλων πόρων που εμφανίζονται μέσα στην κονία πιθανόν να εξαρτάται από άλλους παράγοντες όπως το ποσοστό νερού και την συμπύκνωση των κονιαμάτων ενώ η μικρορηγμάτωση μέσα στην κονία δεν διαφέρει στο πρότυπο και στα δείγματα με ελαστικό.

Η συνάφεια των κόκκων ελαστικού (ελληνικής και γερμανικής προέλευσης) με την τσιμεντόπαστα φαίνεται αρκετά ισχυρή (Εικόνα 9). Περιμετρικά των κόκκων του ελαστικού παρατηρήθηκαν ρωγμές μέσου εύρους 5μm, οι οποίες είναι βέβαιο ότι θα περιοριστούν με τη βελτίωση της πρόσφυσης τσιμεντόπαστας-κόκκων ελαστικού με διάφορους τρόπους.



Εικόνα 9: Επαφή ελαστικού με τσιμεντόπαστα (SEM)

Επίσης οι κόκκοι ελαστικού φαίνεται να εμποδίζουν την εξέλιξη των ρωγμών που σχηματίζονται μέσα στην κονία, σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία [Turatsinze A., 2005] κάτι που έχει αποδειχθεί ότι ισχύει και στα φυσικά αδρανή [Stefanidou M., Papayanni I., 2005].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το σημαντικό θέμα της απόθεσης των φθαρμένων ελαστικών αυτοκινήτων αποκτά ιδιαίτερη σημασία και για την χώρα μας μετά την πρόσφατη θέσπιση του υπ' αριθμόν 109/75/2004 Προεδρικού Διατάγματος σχετικά με τα μέτρα και τους όρους για την εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών των οχημάτων. Στην παρούσα εργασία, η οποία είχε ως αφορμή το διάταγμα αυτό, μελετήθηκαν μηχανικές και φυσικές ιδιότητες τροποποιημένων τσιμεντοκονιαμάτων με φθαρμένα ελαστικά αυτοκινήτων καθώς και μελέτη της μικροδομής τους με χρήση Σαρωτικού Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε κονιοποιημένο φθαρμένο ελαστικό αυτοκινήτων ελληνικής και γερμανικής προέλευσης. Το ελληνικής προέλευσης φθαρμένο ελαστικό περιείχε μικρό ποσοστό υφασμάτων ινών, με αποτέλεσμα να προκαλεί μεγαλύτερες πτώσεις των μηχανικών αντοχών (Οικονόμου, Ν., 2005). Για το λόγο αυτό παρασκευάστηκαν και μελετήθηκαν και συνθέσεις που περιείχαν ελληνικής προέλευσης ελαστικό με και χωρίς την ύπαρξη υφασμάτων ινών σε αυτό (μετά από σχετικό κοσκίνισμα).

Από τη μελέτη της μικροδομής φαίνεται ότι βασικό πρόβλημα στη χρήση κόκκων ελαστικού στα τσιμεντοκονιάματα και κατ' επέκταση σε όλα τα προϊόντα σκυροδέματος είναι η συνάφεια με την τσιμεντόπαστα. Θετικός όμως είναι ο ρόλος τους στις φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων αυτών αφού μειώνεται η τριχοειδής απορρόφηση και το ενεργό πορώδες με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Βελτίωση της συνάφειας των κόκκων ελαστικού με διάφορους τρόπους σαφώς θα βελτίωνε την επίδρασή τους στις ιδιότητες των κονιαμάτων αυτών, στόχος που αποτελεί αντικείμενο περαιτέρω μελέτης μας.

Επίσης τα τσιμεντοκονιάματα με φθαρμένο ελαστικό χωρίς ίνες παρουσίασαν καλύτερα αποτελέσματα. Κατά συνέπεια ιδιαίτερη σημασία έχει ο τρόπος και η διαδικασία παραγωγής του κονιοποιημένου φθαρμένου ελαστικού, το οποίο θα πρέπει να είναι απαλλαγμένο από υπολείμματα (ίνες) που περιέχονται στο πλέγμα του οπλισμού του ελαστικού.

Παρά το γεγονός ότι το προστιθέμενο ποσοστό κονιοποιημένου φθαρμένου ελαστικού αυτοκινήτων στα τσιμεντοκονιάματα που μελετήθηκαν ήταν μόλις 2.5%, δεν θεωρείται αμελητέο δεδομένου πως υπάρχει μια πληθώρα εφαρμογών σε έργα πολιτικού μηχανικού, όπου κατά κύριο λόγο δεν απαιτούνται ιδιαίτερα υψηλές μηχανικές αντοχές όπως στην παραγωγή ηχοπετασμάτων, κυβόλιθων, πλακών πεζοδρομίου, τσιμεντόλιθων κτλ. Επίσης το τσιμέντο και προϊόντα με βάση το τσιμέντο κυριαρχούν στη σημερινή εποχή και επομένως η προσθήκη σε αυτά έστω και μικρών ποσοτήτων φθαρμένων ελαστικών αυτοκινήτων μπορεί να συμβάλει στη μείωση του τεράστιου όγκου των αποθέσεων των ελαστικών και συνεπώς στην προστασία του περιβάλλοντος.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Ali, N.A., Amos, A.D., Roberts, M., (1993), Use of ground rubber tires in portland cement concrete. In: Dhir, R.K. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Concrete 2000, University of Dundee, Scotland, UK, pp. 379–390.
2. Eldin, N.N., Senouci, A.B., (1993), Rubber-tire particles as concrete aggregates, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering 5 (4), pp 478–496.
3. E.T.R.A., EUROPEAN TYRE RECYCLING ASSOCIATION, Εισαγωγή στην ανακύκλωση των ελαστικών, σελ.2-7, <http://www.etra.eu.com>.

4. Κανακόπουλος Δ., (2005), Ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις ανακύκλωσης ελαστικών, Πρακτικά 5^{ης} Διεθνούς Εκθέσεως και Συνεδρίου για την Τεχνολογία Περιβάλλοντος, Heleco 2005, Αθήνα.
5. Khatib Z.K., Bayomy, F.M., (1999), Rubberized Portland cement concrete, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering 11 (3), pp 206-213.
6. Οικονόμου Ν., Σικαλίδης Κ., Μαυρίδου Σ., (2005), Χρήση φθαρμένων ελαστικών αυτοκινήτων στην παραγωγή προϊόντων τσιμέντου, Πρακτικά 2^{ου} Περιβαλλοντικού Συνεδρίου Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη.
7. Προεδρικό Διάταγμα ΥΠ' ΑΡΙΘΜ.109,(2004), Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των μεταχειρισμένων ελαστικών των οχημάτων. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείρισή τους, 5 Μαρτίου 2004, Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος Πρώτο.
8. Rostami, H., Lepore, J., Silverstraim, T., Zundi, I., (1993), Use of recycled rubber tires in concrete. In: Dhir, R.K. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Concrete 2000, University of Dundee, Scotland, UK, pp. 391–399. Rubber Manufacturer's Association, 2000. Washington, DC.
9. Siddique Rafat, Naik R T., (2004), Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview, Waste Management 24, pp 563-569.
10. Stefanidou M., Papayanni I., (2005), The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars, Cement and Concrete Composites Vol.27 Issues 9-10, October-November 2005, pp 914-919.
11. Topçu, I.B., (1995), The properties of rubberized concrete, Cement and Concrete Research 25 (2),pp 304–310.
12. Turatsinze A., Bonnet S., Granju J.-L., (2005), Mechanical characterization of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres, Building and Environment Vol.40, pp 221-226.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΡΙΠΛΩΝ ΕΝΕΜΑΤΩΝ ΥΔΡΑΣΒΕΣΤΟΥ-ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΟΖΟΛΑΝΗΣ – ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΟΖΟΛΑΝΩΝ

Ε.-Ε. Τουμπακάρη

Υπηρεσία Συντήρησης Μνημείων Ακρόπολης, Υπουργείο Πολιτισμού, Πολυγνώτου 10, 10555 Αθήνα

Χ.-Ε. Αδάμη, Ε. Βιντζηλαίου

*Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου
5, 15773 Ζωγράφου, Αθήνα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία αναφέρεται η λογική σχεδιασμού τριμερών συνθέσεων ενεμάτων, η οποία στηρίζεται στον περιορισμό της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και στη χρήση υδρασβέστου και ποζολανών. Παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα αντοχών και μικροδομής και σχολιάζεται η επιρροή των συνθηκών συντήρησης. Τέλος, γίνεται αναφορά σε αποτελέσματα συνάφειας και σχολιάζονται ορισμένοι παράγοντες που την επηρεάζουν. Οι τριμερείς συνθέσεις παρουσιάζουν ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά, περισσότερη έρευνα όμως απαιτείται για την παραγωγή συνθέσεων σταθερών επιτελεστικότητων.

Λέξεις κλειδιά: ιστορικές τοιχοποιίες, τριμερή ενέματα, πυριτική παιπάλη, μετακαολίνη

PROPERTIES AND EFFECTIVENESS OF LIME – NATURAL POZZOLANAS – CEMENT GROUTS WITH ADDITION OF ARTIFICIAL POZZOLANAS

E.-E. Toumbakari

*Office for the Conservation of the Acropolis Monuments, Ministry of Culture, Polygnotou 10,
10555 Athens*

C.-E. Adami, E. Vintzileou

*Laboratory of Reinforced Concrete, School of Structural Engineers NTUA, Iroon Polytechniou 5,
15773 Zografou, Athens*

ABSTRACT: In the present paper, the logic for the development of composite grouts is described, based on the limitation of the cement content and the use of hydrated lime and pozzolans. Characteristic results on strength and microstructure are presented and the effect of curing conditions is discussed. Finally, reference is made on bond results and on factors that affect bond. Composite mixtures present interesting properties, further research is nevertheless required for the production of mixtures with a constant performance.

Keywords: historic masonry, composite grouts, silica fume, metakaoline

ΤΡΙΜΕΡΕΙΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ: ΛΟΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Τα υλικά και οι συνθέσεις των ενεμάτων που προορίζονται για την επισκευή κι ενίσχυση ιστορικών τοιχοποιιών πρέπει να βελτιώνουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων και συγχρόνως να είναι συμβατά από φυσικο-χημικής απόψεως με τα υπάρχοντα υλικά. Η ικανοποίηση της πρώτης απαίτησης κάνει αναπόφευκτη την χρήση υδραυλικών συνθέσεων, καθώς η εφαρμογή αερίων δεν θα επέτρεπε την ανάπτυξη των αντοχών σε ένα εύλογο, από δομοστατικής άποψης, χρονικό ορίζοντα. Παράλληλα, όμως, τεκμηριώθηκε ότι η χρήση συνθέσεων που περιέχουν τσιμέντο σε μεγάλο ποσοστό δεν είναι αναγκαία για το επίπεδο και, κυρίως, το είδος των αντοχών που απαιτούνται σε μια κατασκευή από τοιχοποιία (Vintzileou 2001, Toubakari 2002). Εντούτοις, η πλήρης αντικατάσταση του τσιμέντου από μίγματα που περιέχουν μόνο ασβέστη και ποζολάνη, εμφανίζει το μειονέκτημα της πολύ βραδείας ανάπτυξης των μηχανικών αντοχών. Φυσικά, η παρουσία φυσικών ή τεχνητών ποζολανών είναι απαραίτητη για λόγους ανθεκτικότητας. Επομένως, η χρήση τριμερών συνθέσεων τσιμέντου-υδρασβέστου-ποζολανών αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρό-ταση (Penelis et al. 1988). Από την παράλληλη μελέτη της ανάπτυξης της μικροδομής τριμερών συνθέσεων σε συνδυασμό με τη μελέτη για την αύξηση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών (Toubakari et al. 1999), αποδεικνύεται ότι οι τριμερείς συνθέσεις, είτε αυτές αφορούν σε ενέματα είτε σε κονιάματα, μπορούν να αναπτύξουν μια ευρεία γκάμα μηχανικών αντοχών, χωρίς να πάψουν να πληρούν τα κριτήρια συμβατότητας που θέτουν οι διεθνείς συστάσεις. Στα πλεονεκτήματα των τριμερών συνθέσεων συγκαταλέγεται η χρήση μειωμένης ποσότητας τσιμέντου, οπότε αυτομάτως περιορίζεται το περιεχόμενο του αργίλικού τριασβεστίου, της γύψου και των διαλυτών αλκαλίων, συστατικά τα οποία συγκαταλέγονται μεταξύ των παραγόντων αστοχίας των τοιχοποιιών (Collepardi 1990). Η παρουσία των ποζολανών ενισχύει, άλλωστε, την ανθεκτικότητα και έναντι ατμοσφαιρικής φθοράς (Sabbioni et al. 2001). Στην παρούσα ανακοίνωση γίνεται αναφορά τόσο σε ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες των τριμερών συνθέσεων, όσο και σε πιθανά προβλήματα που σχετίζονται με την ανταγωνιστική ανάπτυξη της ποζολανικής αντίδρασης, της ενυδάτωσης του τσιμέντου και της ενανθράκωσης της υδρασβέστου. Με τη χρήση τεχνητών ποζολανών επετεύχθη σαφής βελτίωση των ιδιοτήτων των συνθέσεων αυτών. Κατά συνέπεια, φαίνεται ότι είναι εφικτός ο σχεδιασμός υλικών στη βάση τριμερών μιγμάτων, τα οποία ανταποκρίνονται σε κριτήρια αντοχής και ανθεκτικότητας ενώ συγχρόνως επιτρέπουν την χρήση υλικών «χαμηλών δυνατοτήτων» (Parayianni 1998).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Υλικά και συνθέσεις

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα τριμερή ενέματα ήταν: (α) σκόνη υδρασβέστου, (β) τσιμέντο Portland CEM I 42.5, (γ) ποζολάνη από την Μήλο (Μηλαϊκή γη) (0-75 μm), (δ) ποζολάνη Rheinisch Trass (0-80 μm), (ε) μετακαολίνης (0-20 μm), (στ) πυριτική παιπάλη και (ζ) υπερρευστοποιητής. Οι συνθέσεις των ενεμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η περιεκτικότητα σε νερό (W/S) κυμαινόταν μεταξύ 0.8-0.9 (για τα ενέματα 13a-0 έως 15b-10), 1.1 (για τα ενέματα G2 και G3) και 0.85-0.90 (για τα ενέματα G1, G4 & G5), και προέκυψε από τις δοκιμές διεισδυτικότητας σε στήλες άμμου με κενά μικρότερα των 0.3mm. Για την αύξηση της ρευστότητας, χρησιμοποιήθηκε υπερρευστοποιητής (1-1.5%-κ.β.στερεών).

Χαρακτηριστικά τριμερών ενεμάτων

Αρχικά μελετήθηκαν ενέματα χωρίς τεχνητές ποζολάνες, με σκοπό να καθοριστεί το ελάχιστο απαιτούμενο ποσοστό τσιμέντου. Δυο ποσοστά τσιμέντου εξετάστηκαν: 10%-κ.β. και 30%-κ.β. στερεών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κάμψη και θλίψη δοκιμίων 40x40x160mm

παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Η θλιπτική αντοχή των ενεμάτων που περιέχουν τσιμέντο Portland σε ποσοστό 30%-κ.β. αυξάνεται σταθερά. Τα ενέματα με αναλογία ασβέστη:ποζολάνη 1:3 εμφάνισαν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από όλα τα υπόλοιπα, φτάνοντας τα 13 MPa. Αντιθέτως, ανάμεσα στα ενέματα με το χαμηλότερο περιεχόμενο ποσοστό τσιμέντου (10%-κ.β.) δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στην θλιπτική αντοχή. Όμως η ιδιότητα που δίνει τις καλύτερες πληροφορίες σχετικά με την μικροδομή του υλικού και την εξέλιξη της είναι η καμπτική αντοχή των ενεμάτων και όχι η θλιπτική τους αντοχή. Οι συνθέσεις που περιέχουν 30% τσιμέντο εμφανίζουν μεγαλύτερες αντοχές σε κάμψη από εκείνες με το 10%. Η καμπτική αντοχή, και για τους δυο τύπους ενεμάτων αυξήθηκε μέχρι την ηλικία των 60 ημερών. Τότε, παρατηρήθηκε μια πτώση της καμπτικής αντοχής των ενεμάτων που περιείχαν.

Πίνακας 1. Συνθέσεις τριμερών ενεμάτων

κωδικός	σύνθεση [%-κ.β.]				υδράσβεστος : ποζολάνες
	υδράσβεστος	Rh.Trass	πυρ.παιπάλη	τσιμέντο	
13a-0	22.5	67.5	0.0	10.0	1:3
14a-0	18.0	72.0	0.0	10.0	1:4
15a-0	15.0	75.0	0.0	10.0	1:5
13b-0	17.5	52.5	0.0	30.0	1:3
14b-0	14.0	56.0	0.0	30.0	1:4
15b-0	11.7	58.3	0.0	30.0	1:5
13b-5	17.5	47.5	5.0	30.0	1:3
14b-5	14.0	51.0	5.0	30.0	1:4
15b-5	11.7	53.3	5.0	30.0	1:5
13b-10	17.5	42.5	10.0	30.0	1:3
14b-10	14.0	46.0	10.0	30.0	1:4
15b-10	11.7	48.3	10.0	30.0	1:5
	υδράσβεστος	μετακαολίνη		τσιμέντο	
G1	20.0	0.0		80.0	-
G2	35.0	35.0		30.0	1:1
G3	47.0	23.0		30.0	2:1
	υδράσβεστος	Μηλαϊκή γη		τσιμέντο	
G4	20.0	50.0		30.0	1: 2.5
G5	35.0	35.0		30.0	1:1

10% τσιμέντο. Στις 180 ημέρες, η καμπτική αντοχή αυτών των ενεμάτων φαίνεται να είναι πρακτικώς μηδενική! Αντίθετα, η καμπτική αντοχή των συνθέσεων που περιείχαν τσιμέντο Portland 30%-κατά βάρος, αυξήθηκε έως την ηλικία των 90 ημερών και έπειτα μειώθηκε ελαφρώς μέχρι τις 180 ημέρες.

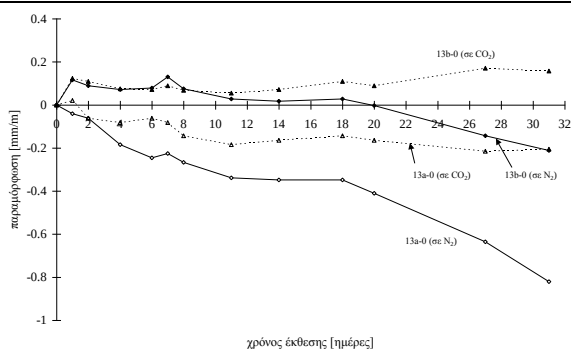
Επιρροή της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και των συνθηκών συντήρησης στην εσωτερική ρηγμάτωση τριμερών συνθέσεων

Η καμπτική αντοχή είναι μια μηχανική ιδιότητα ευάλωτη στην εσωτερική μικρορηγμάτωση. Η παρατηρηθείσα μείωση της αντοχής μπορεί πιθανώς να αποδοθεί σε μια προοδευτική μικρορηγμάτωση, στην οποία τα ενέματα με ποσοστό τσιμέντου 10%κ.β. είναι πιο ευάλωτα. Οι παράγοντες που προκαλούν μικρορηγμάτωση είναι φυσικά η συστολή ξήρανσης καθώς και οι διάφορες χημικές αντιδράσεις (ενυδάτωση τσιμέντου, ποζολανική αντίδραση). Στις μελετηθείσες

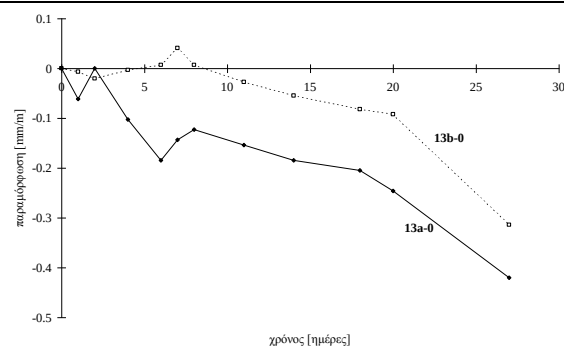
τριμερείς συνθέσεις παρατηρήθηκε η ανάπτυξη δύο περιοχών, μιας εξωτερικής ενανθρακωμένης ζώνης κι ενός πυρήνα,

Πίνακας 2. Θλιπτική και καμπτική αντοχή ενεμάτων αναφοράς [MPa]

ηλικία [ημέρες]	13a-0		14a-0		15a-0		13b-0		14b-0		15b-0	
	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$
14	0.7	0.3	0.6	0.3	0.7	0.4	1.8	0.8	1.8	0.7	1.8	0.7
28	2.2	0.7	2.4	0.9	2.1	0.8	3.2	1.5	3.3	1.3	3.5	1.2
60	4.7	1.6	4.7	1.9	4.5	1.9	6.9	2.0	4.5	1.5	5.5	1.9
90	5.0	1.0	4.9	1.7	5.4	1.1	7.8	2.5	6.5	2.2	7.3	2.3
180	5.6	0.4	4.6	0.4	4.1	0.0	13.1	2.3	10.9	2.0	11.2	1.9



(α)



(β)

Σχήμα 1. Επιρροή (α) των συνθηκών συντήρησης στη μεταβολή του μήκους των δοκιμίων, (β) της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στη μεταβολή του μήκους των δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες N_2 και CO_2

στον οποίο η ενυδάτωση του τσιμέντου και η ποζολανική αντίδραση συνεχίζονταν. Οι παρατηρήσεις αυτές επιβεβαιώθηκαν με την εφαρμογή φαινολφθαλείνης. Οι διαφορετικές συστολές που σχετίζονται με τις δύο αυτές αντιδράσεις πιθανώς δημιούργησαν εφελκυστικές τάσεις στη διεπιφάνεια των δύο αυτών περιοχών, οι οποίες οδήγησαν σε προοδευτική μικρορηγμάτωση. Άλλωστε, στη βιβλιογραφία (Justnes 1998) αναφέρεται ότι η συνολική χημική συστολή συνθέσεων υδρασβέστου – ιπτάμενων τεφρών είναι μεγαλύτερη εκείνης συνθέσεων με τσιμέντο Portland. Αντίστοιχα δεδομένα για συνθέσεις υδρασβέστου – φυσικών ποζολανών δεν είναι, εξ όσων γνωρίζουμε, διαθέσιμα. Για να ελεγχθεί πάντως η υπόθεση αυτή, μετρήθηκε η μεταβολή του μήκους δοκιμίων διαστάσεων 40x40x160mm, τα οποία παρασκευάστηκαν από τα ενέματα 13a-0 και 13b-0 και συντηρήθηκαν σε δύο διαφορετικές συνθήκες: δοκίμια και από τις δύο συνθέσεις συντηρήθηκαν σε αποξηραντή, στον οποίο διοχετευόταν συστηματικά άζωτο (ώστε να αποφευχθεί η ενανθράκωση), ενώ μια άλλη ομάδα δοκιμίων συντηρήθηκε σε αποξηραντή, στον οποίο διοχετευόταν συστηματικά διοξείδιο του άνθρακα (ώστε να επιταχυνθεί η ενανθράκωση). Με τον τρόπο αυτό θεωρούμε ότι επετεύχθη η «περιγραφή» των δύο διαφορετικών ζωνών του υλικού. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα του Σχήματος 1(α), η συστολή των ενεμάτων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες N_2 συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια των δοκιμών και, μάλιστα, είναι πολύ μεγαλύτερη για τη σύνθεση με τη μικρότερη περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Αντίθετα, η μεταβολή μήκους των δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε συνθήκες CO_2 σταματά με το πέρασμα 7-10 ημερών. Στο Σχήμα 1(β) παρουσιάζεται, για κάθε σύνθεση ξεχωριστά, η διαφορά μεταξύ των μεταβολών μήκους που μετρήθηκαν στις δύο διαφορετικές συνθήκες. Η διαφορά αυτή αποτελεί εκτιμήτρια των εντάσεων στη διεπιφάνεια μεταξύ της εξωτερικής ενανθρακωμένης ζώνης και του

πυρήνα. Η διαφορά αυτή είναι σαφώς πιο σημαντική για τη σύνθεση με το μικρότερο ποσοστό τσιμέντου, και συνεπώς θα μπορούσε να εξηγήσει την ανάπτυξη μικρορηγματώσεων, οι οποίες οδηγούν στη μείωση της καμπτικής αντοχής των δοκιμίων. Αντίθετα, η παρουσία ενός μεγαλύτερου ποσοστού τσιμέντου δημιουργεί μια ανθεκτικότερη μικροδομή στις μικρές ηλικίες, στο εσωτερικό της οποίας μπορεί να εξελιχθεί, με το δικό της βραδύτερο ρυθμό, η ποζολανική αντίδραση.

Πίνακας 3. Θλιπτική και καμπτική αντοχή ενεμάτων που περιέχουν πυριτική παιπάλη [MPa]

ηλικία	13b-5		13b-10		14b-5		14b-10		15b-5		15b-10	
[ημέρες]	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$	$f_{gr,c}$	$f_{gr,t}$
28	4.3	1.2	6.5	1.7	4.4	1.2	5.4	1.5	4.1	1.2	5.6	1.2
60	8.2	1.6	11.9	2.0	6.8	1.3	8.7	2.0	7.3	1.2	8.2	1.8
90	12.9	3.0	15.9	3.4	11.5	3.0	16.0	2.6	12.0	2.8	17.2	2.7
180	13.6	3.2	16.0	3.3	13.0	2.7	16.2	2.9	15.8	2.7	16.1	3.0

Επιρροή της προσθήκης πυριτικής παιπάλης και μετακαολίνη στην αντοχή των συνθέσεων

Το δεύτερο μέρος της έρευνας, περιελάμβανε την βελτίωση των τριμερών συνθέσεων με την προσθήκη πυριτικής παιπάλης. Δυο τύποι ενεμάτων εξετάστηκαν: με 5%-κατά βάρος και 10%-κατά βάρος πυριτική παιπάλη, σε αντικατάσταση της ίδιας ποσότητας της Rheinisch Trass. Η προσθήκη της πυριτικής παιπάλης αύξησε την θλιπτική αντοχή των ενεμάτων, ήταν δε ακόμα πιο αποτελεσματική σε σχέση με την καμπτική αντοχή των ενεμάτων (Πίνακας 3). Για παράδειγμα, η καμπτική αντοχή του ενέματος 13b-10 ήταν 40% υψηλότερη από την αντίστοιχη του ενέματος 13b-0. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα ενέματα που σχεδιάστηκαν με ένα λόγο 1:3 παρουσίασαν τις μεγαλύτερες τιμές της καμπτικής αντοχής. Η χρήση της πυριτικής παιπάλης, παρουσιάζει όμως μειονεκτήματα, τα οποία σχετίζονται κυρίως με την βελτιστοποίηση της διασποράς, καθώς απαιτεί συγκεκριμένες συνθήκες ιδιαίτερα στην περίπτωση που η περιεκτικότητα σε νερό πρέπει να διατηρηθεί χαμηλή. Η χρήση πολύ λεπτόκοκκων ποζολανών-όχι όμως τόσο λεπτόκοκκων όσο η πυριτική παιπάλη- θα μπορούσε να είναι μια εναλλακτική πρόταση. Πράγματι, η εφαρμογή του λεπτόκοκκου μετακαολίνη σε ενέματα (Αδάμη 2005), δεν απαιτούσε την χρήση ειδικής μηχανής ανάδευσης, παρόλο που η αυξημένη λεπτότητα των στερεών οδήγησε σε μια αναπόφευκτη αύξηση του περιεχόμενου νερού από 0.8-0.9 σε 1.1-1.2. Σχετικά με τις αντοχές (Πίνακας 4), το ένεμα G2 στις 90 ημέρες προσέγγισε την αντοχή του ενέματος 13b-0 που αντιστοιχεί στις 180 ημέρες. Το ποσοστό του ασβέστη στις δυο συνθέσεις ήταν 30%-κ.β. και 17.5%-κ.β. αντίστοιχα. Η αύξηση του ποσοστού του ασβέστη στο ένεμα G3 (από 35% στο 47%) είχε ως (αναμενόμενο) αποτέλεσμα την μείωση των αναπτυσσόμενων αντοχών. Τα αποτελέσματα του ενέματος G2 είναι συγκρίσιμα με αυτά των 13b-5 και 15b-5 στην ηλικία των 90 ημερών, τα οποία περιέχουν 5%-κ.β. πυριτική παιπάλη. Η σύνθεση του ενέματος G4 είναι πρακτικώς συγκρίσιμη με εκείνη του ενέματος 13b-0. Γενικά, η θλιπτική αντοχή αποτελεί μια καλή ένδειξη για το αν ο λόγος ασβέστη:ποζολάνη είναι ο βέλτιστος για μια σύνθεση.

Επιρροή της προσθήκης μετακαολίνη στην συνάφεια

Σε αυτό το μέρος της έρευνας εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης μετακαολίνη στην συνάφεια σε εφελκυσμό σύνθετων δοκιμίων υποβάθρου/ενέματος, και στην αντοχή και στον τρόπο αστοχίας. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα απευθείας εφελκυσμού με την χρήση μιας τροποποιημένης μεθόδου των θραυσμάτων (Katsaragakis 1987). Εξετάστηκαν τρεις τύποι υποβάθρων: ένα ασβεστολιθικό με χαμηλό πορώδες (μάρμαρο), ένα ασβεστολιθικό με υψηλό πορώδες (τραβερτίνης) και ένα αργιλικό (οπτόπλινθος βυζαντινού τύπου). Για την καλύτερη προσομοίωση του εσωτερικού της τοιχοποιίας στην οποία εγχύνεται τελικώς το ένεμα, έγινε μηχανική τράχυνση

των επιφανειών των ασβεστο-λιθικών υποβάθρων. Το πάχος του αρμού ενέματος του σύνθετου δοκιμίου επιλέχθηκε να είναι ίσο με 3 mm, και υλοποιήθηκε με ένα σύστημα από μεταλλικές πλάκες και ντίζες. Μετά την παρασκευή τους, τα σύνθετα δοκίμια συντηρήθηκαν σε πλαστική μεμβράνη στον υγρό θάλαμο σε συνθήκες σχετικής υγρασίας RH=98%±2 και θερμοκρασίας T=20±2 °C. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις ηλικίες των 28, 60 και 90 ημερών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 4. Θλιπτική και καμπτική αντοχή των ενεμάτων που περιέχουν μετακαολίνη [MPa]

ημέρες	G1 (αναφορά)		G2		G3		G4		G5	
7	13.3	3.7	5.1	1.3	3.5	0.7	1	0.6	-	-
28	14.6	3.4	9.9	2.0	7.3	2.3	3.3	1.7	2.8	0.8
90	17.9	4.5	13.6	1.0	7.9	1.9	7.6	1.9	5.7	1.4
180	25.9	4.7	8.1	1.3	7.1	1.3	6.9	1.3	-	-

Πίνακας 5 Τρόπος αστοχίας και συνάφεια σε εφελκυσμό σύνθετων δοκιμίων που περιέχουν μετακαολίνη [MPa]

ένεμα	ημέρες	υπόβαθρο					
		μάρμαρο		τραβερίτης		οπτόπλινθος	
		θέση αστοχίας	f _t	θέση αστοχίας	f _t	θέση αστοχίας	f _t
G1	28	[Δ+E,Δ+E,Δ]	0.93	[Y,Y,Δ+E]	1.57	[Y,Y,Y]	0.85
G1	90	[Δ+E,Δ+E,Δ]	0.85	[Z,Z,Z]	1.41	[Y,Y,Y]	0.71
G2	28	[Z,Z,Z]	1.04	[E,E,E,Z,E,Z]	1.23	[Y,Y,Y,Y]	0.75
G2	60	[E+Y,E+Y,E+Y]	1.41	[E,E,E+Y]	1.07	[Y,Y,Y+Δ]	0.73
G2	90	[Z,Z,Δ]	1.00	[E,Δ,E+Y]	1.72	[Y,Y,Y]	0.79
G4	28	[Δ,Δ,Δ]	0.33	[-,Z,Z]	1.48	[Y,Y,Y]	0.88
G4	60	[Δ,Δ,Δ]	0.36	[Z,Δ,Z]	1.18	[Y,Y,Y]	0.78
G4	90	[Z,Δ,Z]	0.38	[E,E,E]	0.75	[Y,Y,Y]	0.69

Υπόμνημα:

Δ: αστοχία με αποκόλληση του αρμού ενέματος από το υπόβαθρο (αστοχία της διεπιφάνειας), ένεμα παραμένει κολλημένο στην μια επιφάνεια του υποβάθρου

Z: αστοχία με αποκόλληση του αρμού ενέματος, ένεμα όμως παραμένει συγκολλημένο και στις δυο επιφάνειες του υποβάθρου

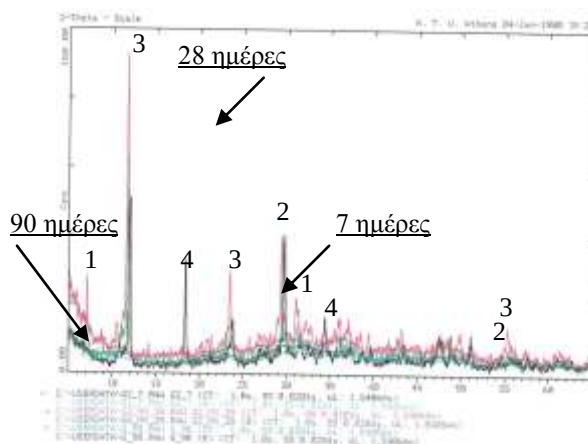
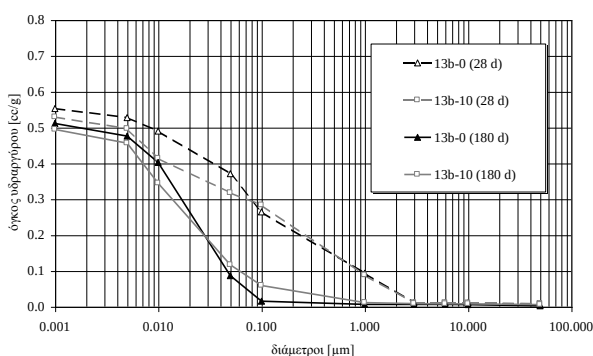
E: εφελκυστική αστοχία του ενέματος

Y: αστοχία στο υπόβαθρο

H ύπαρξη του συμβόλου «+» υποδηλώνει την μίξη δυο τρόπων αστοχίας

Τα αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή των σύνθετων δοκιμίων υποβάθρων/ενέματος κυμαίνονται για όλους τους συνδυασμούς από 0,68MPa έως 1.72MPa. Η διασπορά των τιμών της εφελκυστικής αντοχής εντός κάθε τριάδας δοκιμίων είναι μικρή, κάτι που υποδηλώνει ότι όλα τα ενέματα παρουσιάζουν σταθερότητα. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι η υψηλότερη τιμή της εφελκυστικής αντοχής σύνθετου δοκιμίου εμφανίζεται για όλους τους τύπους των ενεμάτων στο υπόβαθρο του τραβερίτη, κάτι που πιθανώς να οφείλεται στην φυσική τραχύτητα του λίθου λόγω του μεγάλου πορώδους του. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής των σύνθετων δοκιμίων με τον τραβερίτη παρουσιάζουν μια σταθερότητα με τον χρόνο για το ένεμα αναφοράς (της τάξης του 1.5MPa) και μια αυξητική τάση για το ένεμα G2, που για την ηλικία των 90 ημερών προσεγγίζει την τιμή των 1.72 MPa. Η άνοδος αυτή μπορεί να εξηγηθεί από την πύκνωση της δομής της ζώνης της διεπιφάνειας υποβάθρου και ενέματος μετακαολίνη, λόγω της εξέλιξης της ποζολανικής

αντίδρασης. Το ίδιο παρατηρείται και με τα σύνθετα δοκίμια αυτών των συνθέσεων με το μαρμάρينو υπόβαθρο. Σχετικά με το ένεμα G4, παρατηρείται πτώση των αντοχών των δοκιμίων τραβερτίνη/G4 από τις 28 στις 60 και στις 90 ημέρες. Από την μελέτη της επιφάνειας θραύσης διαπιστώνεται η ύπαρξη μιας μεγάλης ενανθρακωμένης ζώνης (ως δέσμη) μέσα στο ένεμα, πράγμα που αποδίδεται στην ποιότητα του λίθου, που λόγω του υψηλού πορώδους του επέτρεψε την είσοδο αέρα στον αρμό του ενέματος. Από την άλλη, η εφελκυστική αντοχή στα σύνθετα δοκίμια με μαρμάρينو υπόβαθρο, είναι 3 φορές μικρότερη από εκείνη των ενεμάτων G1 και G2. Τέλος, για όλους τους συνδυασμούς ενεμάτων/ οπτοπλίνθων η αστοχία εμφανίζεται στο υπόβαθρο. Επομένως η εφελκυστική αντοχή της οπτοπλίνθου είναι μεταξύ 0,69 και 0,88MPa. Όσον αφορά το ύψος ενανθράκωσης του αρμού ενέματος για τα σύνθετα δοκίμια, αυτό είναι μεγαλύτερο για το υπόβαθρο μαρμάρου (της τάξης των 4mm για τις 90 ημέρες για τα ενέματα G1 και G4, 2mm για το G2) και πρακτικώς μηδενικό για τα άλλα υπόβαθρα (μικρότερο από 0,5mm). Επίσης, παρατηρούνται ρηγματώσεις στο εσωτερικό του αρμού του ενέματος για τα ενέματα G2 και G4, πιθανώς λόγω συστολής ξήρανσης.



Σχήμα 2 (α) Μεταβολή του συνολικού πορώδους συνθέσεων με και χωρίς πυριτική παιπάλη στην ηλικία των 28 και 180 ημερών, (β) Αποτελέσματα XRD σύνθεσης G2 για τις 7, 28 και 90 ημέρες
Υπόμνημα: 1. Ένυδρος γελενίτης C_2ASH_8 , 2. C-S-H_i ($2\theta=54,930$), 3. Calcium aluminate hydrates C_xAH_y , 4. Πορτλαντίτης ($Ca(OH)_2$)

Προϊόντα ενυδάτωσης και πορώδες τριμερών συνθέσεων: ενδεικτικά στοιχεία

Σε αυτό το τμήμα της μελέτης παρουσιάζονται τα προϊόντα ενυδάτωσης των ενεμάτων που περιείχαν μετακαολίνη, για τις ηλικίες των 7, 28 και 90 ημερών, τα οποία βρέθηκαν με την μέθοδο της περίθλασης ακτίνων X (XRD). Αρχικώς, αναζητήθηκαν από την βιβλιογραφία τα βασικά προϊόντα ενυδάτωσης του συστήματος μετακαολίνη-ασβέστη. Σε πάστες με λόγο μετακαολίνη:ασβέστη ίσο με 1 (MK:L=1) ταυτοποιήθηκαν ένυδρα πυριτικά ασβέστια (C-S-H) και ένυδρος γελενίτης (C_2ASH_8) (Murat 1983). Επίσης, σε πάστες με την ίδια αναλογία MK:L=1 και περίσσεια νερού μέσω DTA/TG ταυτοποιήθηκαν C_2ASH_8 , C_4AH_{13} (ίχνη) και C-S-H, ενώ στις 180 ημέρες ο πορτλαντίτης έχει καταναλωθεί (Cabrera & Rojas 2001, Rojas & Cabrera 2002). Τα ίδια προϊόντα ενυδάτωσης για διάφορους λόγους MK:L βρήκαν οι Da Silva και Glasser (1992). Στην παρούσα εργασία βρέθηκαν ποσότητες ένυδρου γελενίτη (C_2ASH_8), ένυδρων αργιλικών ασβεστίων (C_xAH_y), ένυδρων πυριτικών ασβεστίων (C-S-H) και πορτλαντίτη (CH). Διαπιστώθηκε επίσης μείωση της περιεκτικότητας σε C_xAH_y σε μεγαλύτερες ηλικίες, σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία. Τέλος, αναφέρεται (ποιοτικά) μείωση του CH και κατανάλωσή του ως τις 90 μέρες (Σχήμα 2β).

Τέλος, στο Σχήμα 2α παρουσιάζεται και συγκρίνεται η εξέλιξη του συνολικού πορώδους των συνθέσεων 13b-0 και 13b-10 στις ηλικίες των 28 και 180 ημερών, όπως μετρήθηκε με ποροσιμετρία υδραργύρου (MIP). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μείωση του πορώδους της σύνθεσης 13b-10 σε σχέση με την 13b-0 στην περιοχή κάτω των 0.1μm στην ηλικία των 28 ημερών, προφανώς λόγω της παρουσίας της πυριτικής παιπάλης. Με το πέρας των 180 ημερών, παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις μια εξαιρετική μείωση του πορώδους, ιδιαίτερα στην περιοχή μεταξύ 0.005-3 μm λόγω κυρίως της εξελισσόμενης ποζολανικής αντίδρασης. Στην ηλικία των 180 ημερών, οι δύο συνθέσεις παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές, παρά το γεγονός ότι στη σύνθεση 13b-10 περιέχεται 10%κ.β. πυριτική παιπάλη.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας επιτρέπουν να συναχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Είναι δυνατή η ανάπτυξη συνθέσεων με την χρήση περιορισμένης ποσότητας τσιμέντου και διάφορων ποσοτήτων ασβέστη και ποζολάνης, τα οποία να παρουσιάζουν καλή μηχανική συμπεριφορά και να είναι σε θέση να αναπτύξουν μια μεγάλη ποικιλία αντοχών.
2. Ένα περιεχόμενο ποσοστό τσιμέντου της τάξης του 30% κατά βάρος είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη ενεμάτων υψηλής διεισδυτικής ικανότητας. Μικρότερα ποσοστά τσιμέντου φαίνεται ότι οδηγούν σε αστάθειες, όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή των ενεμάτων.
3. Οι τριμερείς συνθέσεις είναι ιδιαίτερα ευπαθείς στις συνθήκες συντήρησης. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζονται οι κατάλληλες συνθήκες συντήρησης στο πεδίο για τουλάχιστον δυο έως τρεις εβδομάδες από την εφαρμογή των ενεμάτων.
4. Με τη χρήση τεχνητών ποζολανών επετεύχθη σαφής βελτίωση των ιδιοτήτων των συνθέσεων αναφοράς.

Γενικεύοντας, θεωρούμε ότι οι τριμερείς συνθέσεις μπορούν να αποτελέσουν μια καλή βάση για το σχεδιασμό σύνθετων υλικών μεγάλου εύρους μηχανικών αντοχών ενώ συγχρόνως επιτρέπουν την χρήση υλικών όπως είναι τα βιομηχανικά παραπροϊόντα και οι τεχνητές ποζολάνες.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Αδάμη, Χ.-Ε.. 2005. *Ανάπτυξη και μελέτη των φυσικο-χημικών ιδιοτήτων υψηλής διεισδυτικότητας ενεμάτων ασβέστη-μετακαολίνη. Διερεύνηση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μεταξύ υπαρχόντων και υλικών επισκευής*, Διδ.Διατριβή (υπό εκπόνηση), Εργ.Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ.
2. Cabrera, J. & Frias Rojas, M. 2001. Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system, *Cement and Concrete Research*, 31: 177-182.
3. Collepardi, M. 1990. Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings, *Materials and Structures*, 23: 81-102.
4. Justnes H., Ardoullie, B. Hendrix, E. Sellevold, E. J. & Van Gemert D. 1998. The chemical shrinkage of pozzolanic reaction products, *Proc. 6th Intern.Conf. on "Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete"* - ACI SP 178-33, V.M.Malhotra ed. Bangkok: 191-205.
5. Katsaragakis, ES. 1987. A new tensile test for concrete. *Materials & Structures*, 20:120-125.
6. Murat, M. 1983. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite. *Cement and Concrete Research*, 13 : 259-266.

7. Papayianni, I. 1998. A diachronic principle in construction: the use of mixed type binders – Durability aspects, *Proc J.C.Cabrera Symp.Durability of Building Materials*, R.N.Swamy ed., Bangkok: 115-129.
8. Penelis G., Karaveziroglou M. & Papayianni I. 1988. Grouts for Repairing and Strengthening Old Masonry Structures. *Intern.Conf. on "Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings"-STREMAH*, Brebbia C. ed.: 179-188.
9. Frias Rojas, M. & Cabrera, J. 2002. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water systems, *Cement and Concrete Research*, 32 : 133-138.
10. Sabbioni, C., Zappia, G., Riontino, C., Blanco, M.-T., Aguilera, J., Palomo, A., Van Balen, K. and Toumbakari, E.-E. 2001. Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars, *Atmospheric Environment*, 35 (3): 539-548.
11. De Silva, P.S. & Glasser, F.P. 1993. Phase relations in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration, *Cement and Concrete Research*, 23 : 627-639.
12. Toumbakari, E.-E., Tenoutasse, N. & Van Gemert, D. 1999. Microstructural evolution and mechanical properties of pozzolanic injection grouts. *Proc. 7th Euroseminar on Microscopy applied to Building Materials*, J. A. Larbi et al eds, Delft: 345-353.
13. Toumbakari, E.-E. 2002. *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. Διδ.Διατριβή, Katholieke Univ.Leuven.
14. Vintzileou, E. 2001. The effect of deep rejointing on the compressive strength of brick masonry, *Masonry International*, 15, 1: pp. 8-12.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΟΣ ΑΝΥΔΡΙΤΗ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Σ. Κακαλιάς¹, Σ. Γκογκάκη¹

Τμήμα Παραγωγής HF, Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων, Εργοστάσιο Θεσσαλονίκης

¹: ΧΜ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Πραγματοποιήθηκε μελέτη για την αξιοποίηση του παραπροϊόντος της Βιομηχανίας Φωσφορικών Λιπασμάτων και μελετάται η χρήση του κατά κύριο λόγο ως δομικό υλικό. Το εν λόγω υλικό είναι ο ανυδρίτης, θεικό ασβέστιο CaSO_4 (~97%). Εξετάστηκαν οι ιδιότητες, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του, όπου παρουσιάζονται σε αυτή την εισήγηση. Αποδείχθηκε ότι ο ανυδρίτης είναι αποτελεσματικότερος για αυτή τη χρήση όταν εξουδετερώνεται, καθώς και όταν λειοτριβείται, προκειμένου να γίνει πιο λεπτόκοκκος.

Λέξεις κλειδιά: ανυδρίτης, εξουδετέρωση, λεπτότητα κόκκου.

UTILIZATION OF ANHYDRITE AS A BUILDING MATERIAL

S. Kakalias¹, S. Gogaki¹

HF Production, Phosphoric Fertilizers Industry, Thessaloniki Plant

¹: *Chem. Eng.*

ABSTRACT: A research has been performed about the utilization of the by-product of the Phosphoric Fertilizers Industry and its use for building materials. This material is the common-named anhydrite which is calcium sulfate CaSO_4 (~97%). The properties of the material and the advantages and disadvantages of its use were investigated and revealed in this paper. The results confirm that the anhydrite, when neutralized and grinded (in order to become fine-grained), is more effective as a building material.

Keywords: anhydrite, neutralization, fineness.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη αυτή είναι μέρος του προγράμματος ΕΠΑΝ-ΦΠ47 με τίτλο «Παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας από απορρίμματα Περλίτη, Γύψο και Ιπτάμενη Τέφρα» στο οποίο συμμετέχουν άλλοι 10 φορείς ανάμεσά τους το ΕΚΕΠΥ, το ΕΜΠ, η ΔΕΗ και η TITAN.

Το άνυδρο θειικό ασβέστιο (άνυδρη γύψος ή ανυδρίτης, CaSO_4) είναι ένα στερεό απόβλητο, παραπροϊόν του τμήματος παραγωγής HF της Β.Φ.Λ., εργοστασίου Θεσσαλονίκης.

Σκοπός αυτού του έργου είναι η μελέτη του ανυδρίτη για μελλοντική χρήση του ως δομικό υλικό (συστατικό κονιαμάτων, για αυτοεπιπεδούμενα δάπεδα, κατασκευή ελαφρών θερμοηχομονωτικών τούβλων) και για την επίστρωση οδών. Έτσι, ιδιότητές του όπως η κοκκομετρία, η οξύτητα, η ταχύτητα πήξης και η αντοχή μελετώνται προκειμένου να αποκτήσουν τιμές κατάλληλες για αυτές τις χρήσεις.

Παράλληλα, γίνονται βιομηχανικές δοκιμές, στήνεται pilot plant και τα αποτελέσματα είναι πολύ ενθαρρυντικά και ενδιαφέροντα. Προκύπτει πως το παραγόμενο προϊόν αφού εξουδετερωθεί, λειοτριβηθεί και προστεθούν οι κατάλληλοι ενεργοποιητές αποκτά ιδιότητες που το καθιστούν αξιοποιήσιμο για τις παραπάνω χρήσεις.

ΕΠΑΝ-ΦΠ47

Το πρόγραμμα ΕΠΑΝ-ΦΠ47 έχει τίτλο: “Παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας από απορρίμματα Περλίτη, Γύψου και Ιπτάμενης Τέφρας”. Στο πρόγραμμα αυτό συμμετέχουν διάφοροι φορείς όπως το ΕΜΠ, το ΕΚΕΠΥ, η ΔΕΗ, η TITAN, Μαθιός Πυρίμαχα και η S&B Βιομηχανικά Ορυκτά.

Σκοπός του προγράμματος είναι η εκμετάλλευση παραπροϊόντων των συμμετεχουσών βιομηχανιών ως δομικών υλικών.

Συγκεκριμένα, στη Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων σχηματίζεται ως παραπροϊόν ανυδρίτης ή θειικό ασβέστιο, CaSO_4 το οποίο προς στιγμή αποθηκεύεται σε ειδικό χώρο του εργοστασίου, παραμένοντας ανεκμετάλλευτο.

Μετά το τέλος της μελέτης ο ανυδρίτης θα είναι εκμεταλλεύσιμος εμπορικά και οικονομικά.

Ο ανυδρίτης μπορεί αξιοποιηθεί ως δομικό υλικό σε εφαρμογές:

- ως συστατικό κονιαμάτων,
- για αυτοεπιπεδούμενα δάπεδα,
- για κατασκευή ελαφρών θερμοηχομονωτικών τούβλων και για την επίστρωση οδών

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΝΥΔΡΙΤΗ, CaSO_4

Ο Ανυδρίτης είναι παραπροϊόν του τμήματος παραγωγής HF της Βιομηχανίας Φωσφορικών Λιπασμάτων. Προέρχεται από την αντίδραση φθορίτη, CaF_2 και θεικού οξέως, H_2SO_4 σύμφωνα με την αντίδραση



Από κάθε 1tn φθορίτη παράγονται 1,58 tn ανυδρίτη και ημερησίως παράγονται 50-60 tn ανυδρίτη περίπου.

Οι πιο χαρακτηριστικές ιδιότητες του σχηματιζόμενου ανυδρίτη φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικές ιδιότητες σχηματιζόμενου ανυδρίτη	
Κοκκομετρία	
10,00-5,00 mm	18,0%
5,00-3,15 mm	19,5%
3,15-2,00 mm	13,3%
2,00-1,00 mm	17,8%
1,00-0,10 mm	29,3%
<0,10 mm	2,1%
Πυκνότητα	
loose	1,21 gr/cm ³
taped	1,69 gr/cm ³
Θερμοκρασία	80°C max
Σύνθεση	
CaSO ₄	98,5%
CaF ₂	~0,8%
H ₂ O	0,5%
HF, H ₂ SO ₄	ίχνη
Σχήμα σωματιδίων	Σφαιρικό
Ικανότητα ροής	Χαμηλή
Σκληρότητα	Mohs Scale 3,5
Μη εύκλετο	
Μη εκρηκτικό	
Μη τοξικό	

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΝΥΔΡΙΤΗ

Ο ανυδρίτης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως παράγεται χωρίς να υποστεί επεξεργασία. Τα κυριότερα μειονεκτήματά του (όσον αφορά τη χρήση του ως δομικό υλικό) είναι:

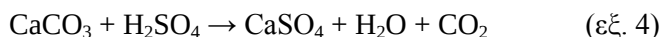
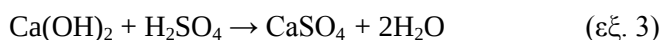
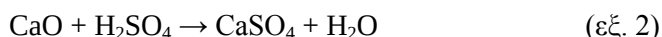
- η οξύτητά του, pH=3,
- η υψηλή κοκκομετρία του,
- η μειωμένη αντοχή του σε θλίψη και κάμψη
- η αυξημένη ταχύτητα πήξης και τέλος
- η μειωμένη ταχύτητα ροής.

Τα πρώτα δύο μειονεκτήματα ελέγχθηκαν και μελετήθηκαν από τη ΒΦΛ, αλλά τα επόμενα τρία εξετάζονται από το ΕΚΕΠΥ.

ΟΞΥΤΗΤΑ ΑΝΥΔΡΙΤΗ

Ο παραγόμενος ανυδρίτης όπως εξέρχεται από τον αντιδραστήρα, περιέχει υπολείμματα οξέων (H_2SO_4 και HF), κυρίως θεικού οξέως. Αν και τα υπολείμματα αυτά βρίσκονται σε ποσοστά που δεν ξεπερνούν το 3%, το pH του στερεού παραπροϊόντος κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3. Προκειμένου όμως να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό θα πρέπει το pH να βρίσκεται στα ουδέτερα επίπεδα, 6,5-7.

Για τον σκοπό αυτό, μελετήθηκαν διάφορα μέσα εξουδετέρωσης, όπως παιπάλη, υδράσβεστος, μαρμαρόσκονη κα. Τα υλικά αυτά προτιμήθηκαν προκειμένου να μην μεταβάλουν την κύρια σύσταση του ανυδρίτη, αντιθέτως μετά την εξουδετέρωση προσφέρουν επιπλέον ποσότητα CaSO_4 , π.χ.



Η μαρμαρόσκονη κατά την προσθήκη της στον ανυδρίτη και την διαλυτοποίησή τους σε νερό εμφανίζει έντονο αφρισμό (λόγω σχηματισμού CO_2 , εξ. 4) και καθιστά το τελικό προϊόν πορώδες και ακατάλληλο για την συγκεκριμένη χρήση.

Ο υδράσβεστος μπορεί να φέρει τα επιθυμητά επίπεδα pH με πολύ μικρή ποσότητά του. Στην περίπτωση αυτή η προσθήκη μικρής περίσσειας $\text{Ca}(\text{OH})_2$ μπορεί να φέρει το pH σε αλκαλικά επίπεδα. Επίσης, και αυτός εμφανίζει αφρισμό (λόγω κάποιων προσμίξεων) και σχηματισμό πορώδους στερεού μετά την ξήρανση του πολτού. Ο αφρισμός ήταν πολύ λιγότερος σε αυτήν την περίπτωση.

Η παιπάλη (εξ. 2) εξουδετερώνει αργά την οξύτητα, αλλά με την προσθήκη της κατάλληλης ποσότητας το pH φτάνει ακριβώς στα επιθυμητά επίπεδα.

Από τις παρατηρήσεις που καταγράφηκαν, επιλέχθηκε η παιπάλη ως μέσο εξουδετέρωσης της οξύτητας του ανυδρίτη και οι δοκιμές που ακολούθησαν πραγματοποιούνται με ανυδρίτη στον οποίο προστίθεται κατάλληλη ποσότητα παιπάλης, με αναλογία περίπου 54 kg παιπάλη/tn ανυδρίτη.

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ

Όπως φαίνεται στον πίνακα 1, το 50% περίπου του σχηματιζόμενου ανυδρίτη έχει μέγεθος μεγαλύτερο από 2000 μm , το 48% είναι μεταξύ 2000 μm και 100 μm και το υπόλοιπο 2% είναι μικρότερο από 100 μm .

Το επιθυμητό μέγεθος είναι το 90% κάτω από τα 100 μm .

Για τον σκοπό αυτό αποφασίστηκε η κατασκευή πιλοτικής μονάδας άλεσης του ανυδρίτη. Ένα σκαρίφημα της διάταξης αυτής φαίνεται στο σχήμα 1.

Περιγραφή πιλοτικής μονάδας

Ένα δοχείο 250l γεμίζεται με ανυδρίτη παραγωγής της προηγούμενης ημέρας. Αυτό συμβαίνει γιατί ο παραγόμενος ανυδρίτης έχει υψηλή θερμοκρασία και πρέπει να ψυχθεί πριν χρησιμοποιηθεί. Από αυτό τροφοδοτείται χειρονακτικά σε σιλό με δονητή. Κάτω από το σιλό υπάρχει κοχλίας που τροφοδοτεί με σταθερό ρυθμό έναν μύλο με σφυριά. Στην περιφέρεια του μύλου ένα πλέγμα επιτρέπει να εξέλθουν μόνο οι κόκκοι με μέγεθος μικρότερο των 250μm. Το δείγμα εξέρχεται ακριβώς κάτω από τον μύλο και συσκευάζεται σε σάκους ή βαρέλια.

Η μέγιστη δυναμικότητα της μονάδας είναι 300Kg/h.

Αποτελέσματα άλεσης

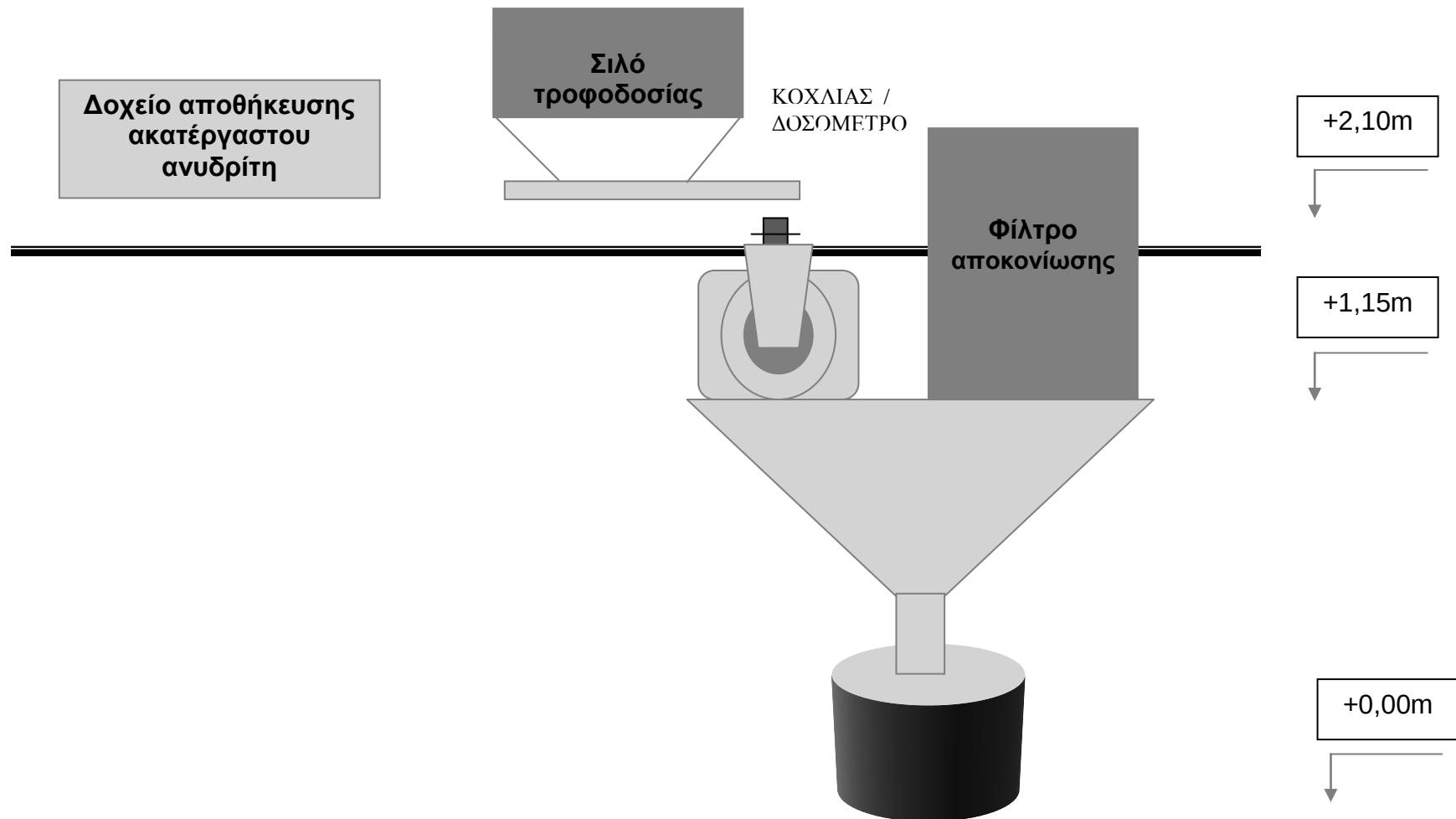
Στον πίνακα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα της άλεσης διαφορετικών δειγμάτων ανυδρίτη. Όπως φαίνεται από τον πίνακα αυτόν, η κοκκομετρία εξόδου εξαρτάται έντονα από την ταχύτητα τροφοδοσίας. Για την μέγιστη τροφοδοσία (300Kg/h) κάτω από 100μm φτάνει το 85%, περίπου. Στη μισή τροφοδοσία, το 93% είναι μικρότερο από 100μm.

Η κοκκομετρία εξόδου φαίνεται να επηρεάζεται δευτερευόντως από την κοκκομετρία της τροφοδοσίας.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα άλεσης ανυδρίτη

A/A δείγματος	Πριν την άλεση					
	1	2	3	4	5	6
>200μm	62,1	61,0	58,3	53,3	58,7	61,5
200-100μm	15,5	17,9	14,1	10,4	10,1	11,1
100-75μm	20,4	15,0	23,5	9,5	9,5	12,4
<75μm	2,0	6,1	4,1	26,8	26,8	15,0
Σ(<100μm)	22,4	21,1	27,6	36,3	36,3	27,4
A/A δείγματος	Μετά την άλεση					
	1	2	3	4	5	6
>200μm	2,0	2,9	1,7	1,4	0,9	1,3
200-100μm	14,6	12,7	22,9	5,4	2,2	3,8
100-75μm	47,7	63,2	55,6	11,8	4,3	6,2
<75μm	35,7	21,2	19,8	81,4	92,6	88,7
Σ(<100μm)	83,4	84,4	75,4	93,2	96,9	94,9
Τροφοδοσία (Kg/h)	300	300	300	110	120	130

Σχήμα 1: Διάταξη πιλοτικής εγκατάστασης άλεσης ανυδρίτη



ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΩΝ

Η μελέτη της αντοχής του ανυδρίτη πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του ΕΚΕΠΥ. Η αντοχή του καθαρού ανυδρίτη δεν είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα και για αυτό μελετήθηκαν διάφορα πρόσθετα/ενεργοποιητές.

Στον πίνακα 3 δίνονται οι αντοχές σε θλίψη και κάμψη διαφόρων μιγμάτων ανυδρίτη. Στα διαγράμματα 1 και 2 φαίνονται σχηματικά τα αποτελέσματα. Εξετάζεται μήπως η προσθήκη K_2SO_4 και Na_2SO_4 σε αναλογία 5%, το καθένα, είναι η βέλτιστη.

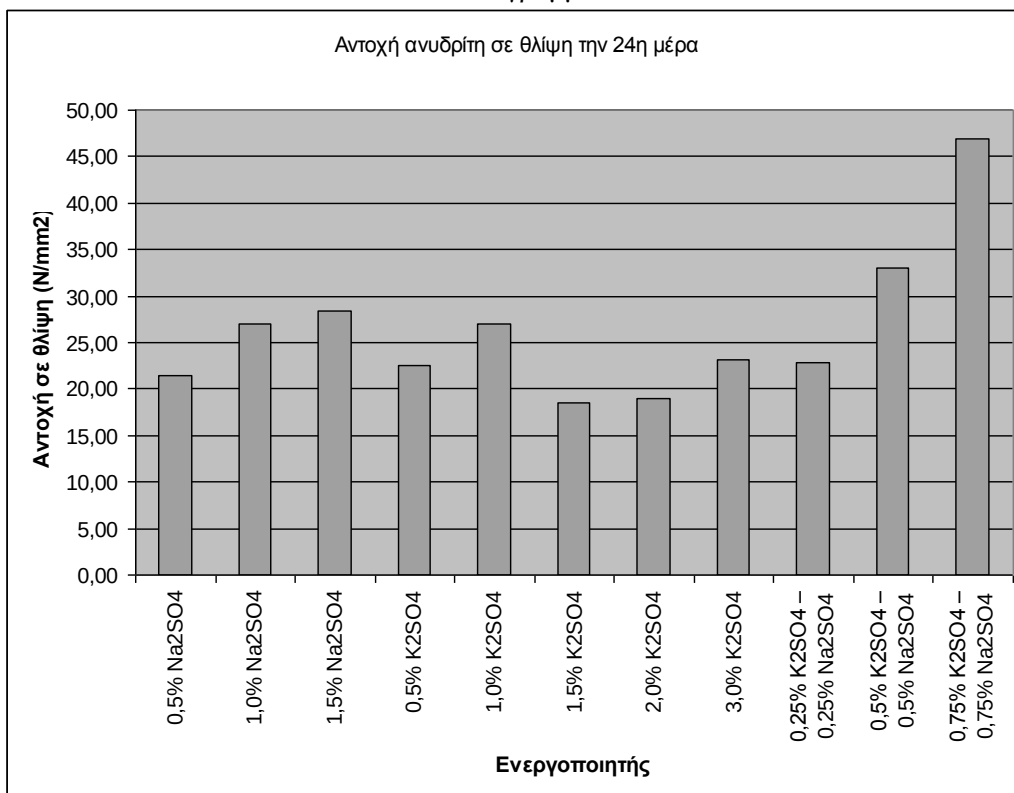
Πίνακας 3: Αντοχή ανυδρίτη την 24η ημέρα με την προσθήκη ενεργοποιητών

Ενεργοποιητής	Αντοχή σε κάμψη	Αντοχή σε θλίψη
0,5% Na_2SO_4	3,96	21,45
1,0% Na_2SO_4	5,08	27,05
1,5% Na_2SO_4	5,23	28,35
0,5% K_2SO_4	4,64	22,55
1,0% K_2SO_4	4,52	27,05
1,5% K_2SO_4	2,71	18,55
2,0% K_2SO_4	2,42	18,95
3,0% K_2SO_4	4,54	23,10
0,25% K_2SO_4 – 0,25% Na_2SO_4	8,12	22,85
0,5% K_2SO_4 – 0,5% Na_2SO_4	7,70	33,00
0,75% K_2SO_4 – 0,75% Na_2SO_4	5,88	46,90

Διάγραμμα 1



Διάγραμμα 2



ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ – ΕΝΑΣ ΑΛΛΟΣ ΔΡΟΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Δ. Πάνιας, Ι. Π. Γιαννοπούλου και Α. Κοεμτζοπούλου

*Εργαστήριο Μεταλλουργίας, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο
Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου, Αθήνα. e-mail: panias@metal.ntua.gr*

Θ. Περράκη

Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η τεχνολογία του γεωπολυμερισμού μπορεί να εφαρμοστεί για την αξιοποίηση στερεών παραπροϊόντων αργιλοπυριτικής σύστασης της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής βιομηχανίας. Τα γεωπολυμερή είναι υλικά που προκύπτουν από τη χημική αντίδραση μεταξύ αργιλοπυριτικών στερεών υλικών με αλκαλικά πυριτικά διαλύματα, υπό έντονα αλκαλικές συνθήκες. Προκαταρκτικές εργαστηριακές δοκιμές γεωπολυμερισμού ελληνικών ιπταμένων τεφρών από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έδειξαν ότι είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή δομικών υλικών.

Λέξεις κλειδιά: γεωπολυμερισμός, ιπτάμενη τέφρα, ανόργανα πολυμερή

GEOPOLYMERIZATION – AN ALTERNATIVE WAY FOR THE EXPLOITATION OF SOLID WASTE MATERIALS

D. Pantias, I. P. Giannopoulou and A. Koemtzopoulou

Laboratory of Metallurgy, School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9, 15780 Athens – Greece.

e-mail: pantias@metal.ntua.gr

Th. Perraki

Section of Geological Sciences, School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens

ABSTRACT: During the last decades, geopolymerization is used for the exploitation of solid, aluminosilicate wastes that are produced in the mining and metallurgical industry. Geopolymerization involves the chemical reaction between solid aluminosilicate materials and alkaline silicate solutions under strong alkaline conditions. Preliminary tests for the exploitation of coal fly ash from Greek power stations indicate that geopolymerization is a promising technology for the production of construction materials.

Keywords: geopolymerization, fly ash, inorganic polymers

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βιομηχανικοί κλάδοι που συνδέονται με τη μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα παράγουν ετησίως τεράστιες ποσότητες στερεών παραπροϊόντων, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων παραμένει ανεκμετάλλευτο και απορρίπτεται ή αποτίθεται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Το γεγονός αυτό έχει σα συνέπεια, αφ' ενός μεν τη δημιουργία σοβαρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο έδαφος, στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα και στην ατμόσφαιρα, αφ' εταίρου δε την απώλεια χρήσιμων υλικών, αφού τα περισσότερα από τα παραγόμενα στερεά παραπροϊόντα μπορούν να αποτελέσουν εν δυνάμει πρώτες ύλες σε αρκετές παραγωγικές δραστηριότητες.

Η ευρωπαϊκή, αλλά και η εθνική Νομοθεσία για την προστασία του περιβάλλοντος θέτουν αυστηρούς όρους για τη διαχείριση των στερεών παραπροϊόντων που παράγονται από τη μεταλλευτική και μεταλλουργική βιομηχανία. Ουσιαστικά, επιβάλλουν τη διαχείριση των στερεών παραπροϊόντων με τεχνικές σύμφωνες με τις αρχές και τους στόχους την ευρωπαϊκής κοινοτικής περιβαλλοντικής πολιτικής, η οποία προϋποθέτει την αξιοποίηση των στερεών παραπροϊόντων, όπου αυτό είναι δυνατόν, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η συνετή διαχείριση των φυσικών πόρων. Για το λόγο αυτό, η αναζήτηση βιώσιμων λύσεων για την αξιοποίηση των στερεών παραπροϊόντων αποτελεί τα τελευταία χρόνια αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης. Λόγω του μεγέθους των ποσοτήτων των στερεών αποβλήτων της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής βιομηχανίας, η αναζήτηση αυτή εστιάζεται κυρίως σε εφαρμογές υλικών και προϊόντων που συνδέονται με τον κατασκευαστικό τομέα.

Προς αυτή την κατεύθυνση, επιδιώκεται η ανάπτυξη τεχνολογιών χαμηλού κόστους, κατάλληλων για να μετατρέψουν τα στερεά παραπροϊόντα σε χρήσιμες πρώτες ύλες για την παραγωγή προϊόντων με εμπορική αξία. Μεταξύ των τεχνολογιών αυτών, ο γεωπολυμερισμός, εκμεταλλευόμενος την αργιλοπυριτική σύσταση αρκετών παραπροϊόντων της μεταλλευτικής και μεταλλουργικής βιομηχανίας (απορρίμματα εκμετάλλευσης αργιλοπυριτικών κοιτασμάτων καολίνη, αστρίων, κλπ., ιπτάμενες τέφρες από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, απορρίμματα εμπλουτισμού μεταλλευμάτων, μεταλλουργικές σκωρίες, κλπ.), παρέχει τη δυνατότητα μετατροπής τους σε χρήσιμα υλικά για ένα πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών του κατασκευαστικού τομέα, εναλλακτικά και ανταγωνιστικά αρκετών συμβατικών υλικών.

Ο γεωπολυμερισμός είναι μία νέα, καινοτόμος τεχνολογία που αναπτύσσεται ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Η τεχνολογία αυτή στηρίζεται στη χημική αντίδραση μεταξύ ανόργανων στερεών υλικών, πλουσίων σε οξείδια πυριτίου και αργιλίου και αλκαλικών πυριτικών διαλυμάτων, κάτω από ισχυρά αλκαλικές συνθήκες και οδηγεί στην παραγωγή ανόργανων πολυμερών υλικών, των γεωπολυμερών. Τα γεωπολυμερή υλικά, θεωρείται ότι αποτελούνται από τρισδιάστατες, πολυμερικές δομές που δημιουργούνται μέσω της πολυσυμπύκνωσης ολιγομερών του τύπου $-Si-O-Al-O-$, τα οποία αναπτύσσονται ευθύς αμέσως μόλις τα στερεά αργιλοπυριτικά υλικά αναμειχθούν με την ισχυρά αλκαλική, πυριτική, υδατική φάση. Η ανάμειξη των δύο φάσεων, στερεής και υγρής, οδηγεί στο σχηματισμό ενός ιξώδους πολφού που μπορεί εύκολα να μορφοποιηθεί, προσδίδοντας στα τελικά προϊόντα το επιθυμητό σχήμα. Στη συνέχεια, τα μορφοποιημένα προϊόντα υφίστανται ωρίμανση σε θερμοκρασία συνήθως μικρότερη των $100^{\circ}C$ και μετατρέπονται σε συμπαγή, ανθεκτικά υλικά με εξαιρετικές φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες. Ο χρόνος της αντίδρασης του γεωπολυμερισμού είναι εκπληκτικά μικρός και τα παραγόμενα υλικά είναι άμορφα ή ημι-κρυσταλλικά, ανάλογα με τις συνθήκες ωρίμανσης (Xu and Van Deventer, 2000).

Τα γεωπολυμερή χαρακτηρίζονται από χαμηλό φαινόμενο πορώδες ή νανο-πορώδες και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε διαδοχικούς κύκλους ψύξης - θέρμανσης και

παρουσιάζουν σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες (1200 – 1400°C), υψηλή πρώιμη και τελική αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, αμελητέα συρρίκνωση της μάζας τους και μεγάλη αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν τα γεωπολυμερή εφάμιλλα των συμβατικών υλικών και ανοίγουν το πεδίο εφαρμογής τους σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, όπως της παραγωγής δομικών υλικών και υλικών οδοποιίας, της παραγωγής πυριμάχων υλικών, της μεταλλουργίας, της χύτευσης μετάλλων, της αεροναυπηγικής, κλπ.

Η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας του γεωπολυμερισμού σε ένα ευρύ φάσμα στερεών βιομηχανικών αποβλήτων και παραπροϊόντων αργιλοπυριτικής σύστασης, με στόχο την παραγωγή ανόργανων πολυμερών υλικών, κατάλληλων για την κατασκευή δομικών υλικών, παρουσιάζει στις μέρες μας ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Προς αυτή την κατεύθυνση έχει αναπτυχθεί ένα εκτεταμένο πεδίο έρευνας που εστιάζεται κυρίως στη διερεύνηση του γεωπολυμερισμού της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται από την καύση του λιγνίτη στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Swanepoel and Strydom 2002, J.G.S. van Jaarsveld et al. 1997), των απορριμμάτων της εκμετάλλευσης διαφόρων αργιλοπυριτικών κοιτασμάτων (R. Cioffi et al. 2003, Hua Xu and van Deventer 2003) και των σκωριών μεταλλουργικών καμίνων (T.W. Cheng and J.P. Chiu 2003, Phair and Van Deventer 2002).

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η χημεία του γεωπολυμερισμού και οι βασικές διεργασίες του και διερευνάται η δυνατότητα γεωπολυμερισμού της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται από την καύση του λιγνίτη στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Μεγαλόπολης, με στόχο την παραγωγή δομικών υλικών.

ΧΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΥ

Ο όρος “γεωπολυμερισμός” αναφέρεται στη διεργασία σχηματισμού ανόργανων πολυμερών υλικών (-πολυμερισμός) χρησιμοποιώντας σαν δότες πυριτίου και αργιλίου αργιλοπυριτικά ορυκτά ή στερεά παραπροϊόντα αργιλοπυριτικής σύστασης (γέω-). Πρόκειται για μια πολύπλοκη, ετερογενή χημική διεργασία ανάμεσα σε μια στερεή φάση αργιλοπυριτικής φύσης και σε ένα ισχυρά αλκαλικό πυριτικό διάλυμα που διεξάγεται κάτω από ήπιες ατμοσφαιρικές συνθήκες (θερμοκρασίες μικρότερες των 100°C και ατμοσφαιρική πίεση). Η διεργασία οδηγεί τελικά στο σχηματισμό συμπαγών και ανθεκτικών υλικών πολυμερικής φύσης που αποκαλούνται “γεωπολυμερή υλικά”. Παρά την εκτεταμένη έρευνα στο αντικείμενο του γεωπολυμερισμού διαφόρων αργιλοπυριτικών υλικών και την τεχνολογική ανάπτυξη ενός ευρέως φάσματος γεωπολυμερών υλικών, ο μηχανισμός βάσει του οποίου δημιουργούνται τα τελικά προϊόντα δεν έχει γίνει απόλυτα κατανοητός. Οι περισσότεροι ερευνητές υποστηρίζουν ότι η διεργασία του γεωπολυμερισμού συμπεριλαμβάνει τις τέσσερις παρακάτω χημικές διεργασίες οι οποίες εξελίσσονται παράλληλα και συνεπώς, δεν είναι δυνατό να διακριθούν πλήρως μεταξύ τους (Davidovits 1988, Van Jaarsveld et al. 1997, Xu and Van Deventer 2000):

Διάλυση πυριτίου και αργιλίου από τη στερεή φάση αργιλοπυριτικής φύσης μέσα στο ισχυρά αλκαλικό υδατικό περιβάλλον.

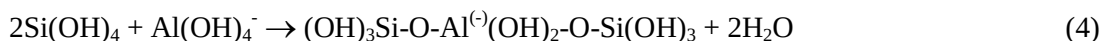
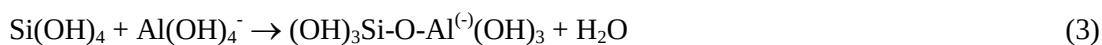
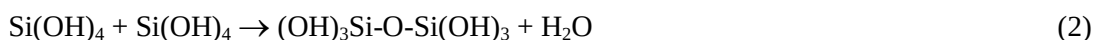
Είναι γνωστό ότι στην επιφάνεια των κόκκων των αργιλοπυριτικών υλικών που βρίσκονται μέσα σε υδάτινο περιβάλλον αναπτύσσονται επιφανειακά υδροξυλιωμένες θέσεις γνωστές ως Silanol (>Si-OH) και Aluminol (>Al-OH) groups (Stumm W. 1987). Οι θέσεις αυτές αποτελούν τις επιφανειακές ενεργές θέσεις πάνω στις οποίες δρουν χημικά τα OH⁻ του ισχυρά αλκαλικού περιβάλλοντος σχηματίζοντας επιφανειακά χημικά είδη από τα οποία εν συνεχεία μέσω ενός σύνθετου μηχανισμού μεταφέρονται το Si και το Al στο υδατικό διάλυμα ολοκληρώνοντας τη χημική διαδικασία της διάλυσης. Μακροσκοπικά, η ανωτέρω διαδικασία περιγράφεται από τη χημική εξίσωση (1).



Η διάλυση των αργιλοπυριτικών ορυκτών και εν γένει των φάσεων αργιλοπυριτικής σύστασης ευνοείται στην αλκαλική περιοχή εφόσον η ταχύτητα διάλυσης τους αυξάνει σημαντικά με αύξηση του pH της υδατικής φάσης (Stumm W. 1990, Hu and Van Deventer 2000). Επιπλέον, η ταχύτητα διάλυσης εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος των κόκκων και την ειδική τους επιφάνεια εφόσον πρόκειται περί μιας τυπικής ετερογενούς χημικής διεργασίας (Hu and Van Deventer 2000).

Εναρξη πολυμερισμού στην υδατική φάση - σχηματισμός олиγομερών χημικών ειδών

Καθώς η συγκέντρωση πυριτίου και αργιλίου στην υδατική φάση αυξάνεται σταδιακά, τα μονοπυριτικά υδροξυσύμπλοκα πυριτίου και αργιλίου αντιδρούν μεταξύ τους δημιουργώντας πρόδρομα ολιγομερή πολυπυριτικά υδροξυσύμπλοκα μέσω πολυμερικών δεσμών του τύπου Si-O-Si και Si-O-Al, όπως φαίνεται παραστατικά με τις χημικές εξισώσεις (2), (3) και (4).

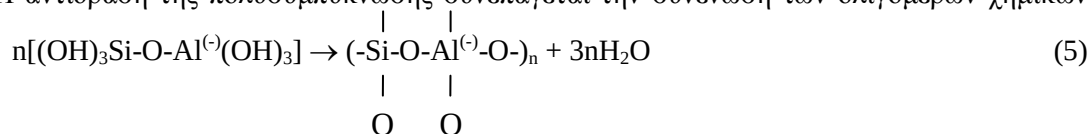


Ο σχηματισμός των πρόδρομων ολιγομερών χημικών ειδών προάγεται από τη παρουσία εν διαλύσει πυριτικών αλκαλίων (συνήθως πυριτικού νατρίου) στην αρχική ισχυρά αλκαλική υδατική φάση που χρησιμοποιείται κατά τη διεργασία του γεωπολυμερισμού. Τα εν διαλύσει πυριτικά αλκάλια αυξάνουν σημαντικά την αρχική συγκέντρωση Si ωθώντας κυρίως την αντίδραση (2) προς τη κατεύθυνση σχηματισμού των δεσμών Si-O-Si και δευτερευόντως τις αντιδράσεις (3) και (4) προς τη κατεύθυνση σχηματισμού των δεσμών Si-O-Al, ενισχύοντας σημαντικά την εκκίνηση του σχηματισμού των βασικών δομικών μονάδων του πλέγματος του γεωπολυμερούς (Phair and Van Deventer, 2002).

Πολυσυμπύκνωση των ολιγομερών

Καθώς η συγκέντρωση των πρόδρομων ολιγομερών χημικών ειδών αυξάνεται στην υδατική φάση, αρχίζει η πολυσυμπύκνωσή τους η οποία οδηγεί βαθμιαία στη δημιουργία ενός τρισδιάστατου πυριτικού και αργιλοπυριτικού πλέγματος, το οποίο αποτελείται από τετράεδρα κυρίως SiO₄ αλλά και AlO₄ που μοιράζονται μεταξύ τους κοινά ιόντα οξυγόνου, όπως παραστατικά φαίνεται στη χημική εξίσωση (5):

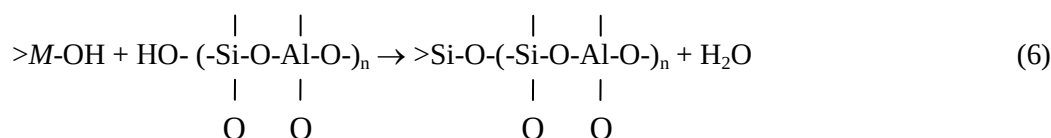
Η αντίδραση της πολυσυμπύκνωσης συνεπάγεται την συνένωση των ολιγομερών χημικών ειδών



με ταυτόχρονη απομάκρυνση μορίων νερού, διεργασία που είναι γνωστή με τον όρο πολυμερισμός. Τα ολιγομερή είναι δυνατόν να αντιδράσουν σε κάθε υδροξυλιομένη θέση σχηματίζοντας αρχικά μακρομοριακές αλυσίδες ή δακτυλίους και εν συνεχεία, τρισδιάστατα πλέγματα. Η υποκατάσταση Si⁴⁺ από Al³⁺ κατά τη διεργασία του πολυμερισμού (αντιδράσεις 3, 4, 5) οδηγεί σε πλεόνασμα αρνητικού φορτίου στις θέσεις όπου απαντώνται τα ιόντα Al, διαταράσσοντας την ισορροπία ηλεκτρικού φορτίου. Προκειμένου να επιτευχθεί ηλεκτροουδετερότητα και να εξισορροπηθεί το πλεόνασμα του αρνητικού φορτίου στο πολυμερικό πλέγμα, διάφορα κατιόντα που υπάρχουν εν διαλύσει στην υδατική φάση (Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺⁺, Ba⁺⁺, NH₄⁺, H₃O⁺, κλπ.) ροφώνται στις κοιλότητες του πολυμερικού πλέγματος, πλησίον των θέσεων που βρίσκονται τα ιόντα του αργιλίου, όπως συμβαίνει σε όλα σχεδόν τα αργιλοπυριτικά ορυκτά (Davidovits 1999).

Δέσμευση αδιάλυτων κόκκων - σκλήρυνση συστήματος

Καθώς το τρισδιάστατο πλέγμα αναπτύσσεται μέσα στην υδατική φάση συναντά τις επιφάνειες των αδιάλυτων κόκκων με τις οποίες είναι δυνατό να αντιδράσει χημικά τερματίζοντας την ανάπτυξη του, όπως φαίνεται παραστατικά στη χημική εξίσωση (6). Οι ενεργές αυτές επιφανειακές θέσεις, οι οποίες παριστάνονται με >M-OH στην εξίσωση (6), δεν είναι άλλες από τα Silanol (>Si-OH) και Aluminol (>Al-OH) groups που αναπτύσσουν δεσμούς >Si-O-Si και >Al-O-Si με το τέλος της αργιλοπυριτικής αλυσίδας, δένοντας χημικά με αυτό τον τρόπο τους αδιάλυτους κόκκους με το πολυμερικό πλέγμα. Ταυτόχρονα, η αύξηση του βαθμού πολυμερισμού στη υδατική φάση και η απομάκρυνση του ελεύθερου νερού που λαμβάνουν χώρα κατά την φάση της ωρίμανσης του γεωπολυμερούς υλικού, οδηγούν αναπόφευκτα στη σκλήρυνσή του και στη δημιουργία ενός συμπαγούς και ανθεκτικού υλικού.



όπου *M*: Si ή Al.

ΓΕΩΠΟΛΥΜΕΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Χαρακτηρισμός των υλικών

Η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές γεωπολυμερισμού της παρούσας εργασίας προέρχεται από τούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Μεγαλόπολης. Η χημική της ανάλυση παρουσιάζεται στον Πίνακα 1, ενώ στο Σχήμα 2(α) παρουσιάζεται η ορυκτολογική της ανάλυση. Για τη σύνθεση των γεωπολυμερών, η ιπτάμενη τέφρα λειοτριβήθηκε μέχρι μέσο μέγεθος κόκκων περίπου 10μm. Τα χημικά αντιδραστήρια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στερεό NaOH (pellets) και διάλυμα πυριτικού νατρίου (Na₂SiO₃) με κατά βάρος περιεκτικότητα 8% σε Na₂O και 27% σε SiO₂, καθώς επίσης και απιονισμένο νερό.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση της ιπτάμενης τέφρας

metal oxide	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	L.o.I.	Total
mass (%)	47,50	37,00	1,05	0,28	1,86	0,14	0,32	0,01	0,12	12,09	100,37

Πειραματική διαδικασία

Αρχικά ετοιμάζεται η υγρή φάση της σύνθεσης που αποτελείται από απιονισμένο νερό, στο οποίο διαλύεται στερεό υδροξείδιο του νατρίου και διάλυμα πυριτικού νατρίου σε αναλογίες που δίνονται στον Πίνακα 2. Στην υγρή φάση προστίθεται η στερεά φάση (ιπτάμενη τέφρα) και το μίγμα που προκύπτει αναμειγνύεται επιμελώς, ομογενοποιείται και μεταφέρεται σε κυλινδρικά, πλαστικά καλούπια. Η επιφάνεια των καλουπιών καλύπτεται με πλαστικό κάλυμμα και ακολουθεί η φάση της ωρίμανσης των γεωπολυμερών. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της ωρίμανσης, τα καλούπια αφαιρούνται και τα παραγόμενα υλικά αφήνονται για σκλήρυνση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, πριν την διεξαγωγή των δοκιμών αντοχής σε ανεμώδιστη μονοαξονική θλίψη. Οι δοκιμές αντοχής έγιναν εις διπλούν σε εξοπλισμό της εταιρείας STRUCTURAL BEHAVIOR ENGINEERING LABORATORIES INC. (MODEL PTL-10) και υπολογίστηκε ο μέσος όρος.

Πίνακας 2. Σύνθεση γεωπολυμερών.

Πρώτες ύλες	Ιπτάμενη τέφρα	NaOH	Διάλυμα πυριτικού νατρίου	Απιονισμένο νερό	Σύνολο
Mass (%)	60,00	7,00	7,00	26,00	100,00

Για τη μελέτη της επίδρασης των συνθηκών ωρίμανσης των γεωπολυμερών στην αντοχή που αναπτύσσουν σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη επιλέγησαν δύο τιμές θερμοκρασίας ωρίμανσης 25°C (θερμοκρασία περιβάλλοντος) και 60°C καθώς επίσης και τέσσερις τιμές χρόνου ωρίμανσης 6h, 24h, 48h και 72h. Στα παραγόμενα γεωπολυμερή έγιναν επίσης αναλύσεις περιθλασιμετρίας ακτίνων X και φασματοσκοπίας υπερύθρου (IR).

Αποτελέσματα – Συζήτηση των αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη που ανέπτυξαν τα παραγόμενα γεωπολυμερή, ενώ στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται (α) η επίδραση των συνθηκών ωρίμανσης στη μηχανική αντοχή και (β) ο τρόπος θραύσης των παραγομένων γεωπολυμερών.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη.

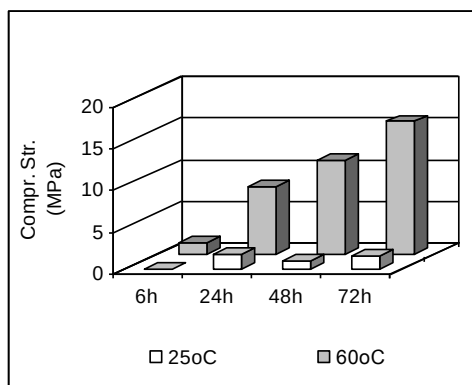
Γεωπολυμερές	Συνθήκες ωρίμανσης		Χρόνος σκλήρυνσης	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (MPa)
	Θερμοκρασία	Χρόνος		
MEAG2-5A-6H-60°C-7D	60°C	6h	7 days	1,38
MEAG2-5A-24H-60°C-7D	60°C	24h	7 days	8,07
MEAG2-5A-48H-60°C-7D	60°C	48h	7 days	11,29
MEAG2-5A-72H-60°C-7D	60°C	72h	7 days	15,90
MEAG2-5A-6H-25°C-7D	25°C	6h	7 days	-
MEAG2-5A-24H-25°C-7D	25°C	24h	7 days	1,83
MEAG2-5A-48H-25°C-7D	25°C	48h	7 days	1,04
MEAG2-5A-72H-25°C-7D	25°C	72h	7 days	1,56

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3, οι συνθήκες ωρίμανσης των γεωπολυμερών επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή που αναπτύσσουν σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη. Τα γεωπολυμερή που έχουν ωριμάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αναπτύσσουν πολύ μικρή αντοχή, ενώ τα γεωπολυμερή που έχουν ωριμάσει σε θερμοκρασία 60°C αναπτύσσουν μεγαλύτερη αντοχή που αυξάνεται καθώς αυξάνει ο χρόνος ωρίμανσης, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο Σχήμα 1(α). Πιο συγκεκριμένα, τα γεωπολυμερή που έχουν ωριμάσει σε θερμοκρασία 60°C για 72 ώρες ανέπτυξαν τη μεγαλύτερη αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (15,90 MPa), ενώ αντίθετα αυτά που έχουν ωριμάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 6 ώρες δεν ανέπτυξαν καμία αντοχή στην ίδια δοκιμή.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών αντοχής σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη, τα παραγόμενα υλικά συμπεριφέρονται όπως τα φυσικά πετρώματα και αστοχούν σε συγκεκριμένες επιφάνειες χωρίς να θρυμματίζονται όπως τα κοκκώδη υλικά (Σχήμα 1(β)). Επομένως, τα παραγόμενα γεωπολυμερή είναι συμπαγή, ανθεκτικά υλικά, τα οποία φαίνεται να είναι εσωτερικά καλώς δομημένα.

Στο Σχήμα 2(α) παρουσιάζονται τα διαγράμματα περιθλασιμετρίας ακτίνων X (i) της ιπτάμενης τέφρας και (ii), (iii), (iv) και (v) των γεωπολυμερών που ωρίμασαν σε θερμοκρασία 60°C για

χρονικά διαστήματα 6, 24, 48 και 72 ωρών αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2(α), τα παραγόμενα γεωπολυμερή δεν παρουσιάζουν σημαντικές ορυκτολογικές διαφορές, συγκριτικά με την ιπτάμενη τέφρα. Ουσιαστικά, μόνο η ορυκτολογική φάση του Ανυδρίτη (CaSO_4) της ιπτάμενης τέφρας δεν απαντάται στα γεωπολυμερή. Επιπλέον, τα διαγράμματα του Σχήματος 2(α) πολύ δύσκολα αποκαλύπτουν τη δημιουργία άμορφων φάσεων στα παραγόμενα γεωπολυμερή, αν και προσεκτικότερη παρατήρηση μπορεί να εντοπίσει δύο περιοχές: την πρώτη στην περιοχή της κύριας κορυφής του χαλαζία ($20^\circ < 2\theta < 35^\circ$) και τη δεύτερη στην περιοχή $2\theta < 10^\circ$, όπου απαντώνται συνήθως αργιλικές ζεολιθικές φάσεις. Ο σχηματισμός άμορφων φάσεων είναι εντονότερος στα γεωπολυμερή που έχουν ωριμάσει σε θερμοκρασία 60°C για 72 ώρες.

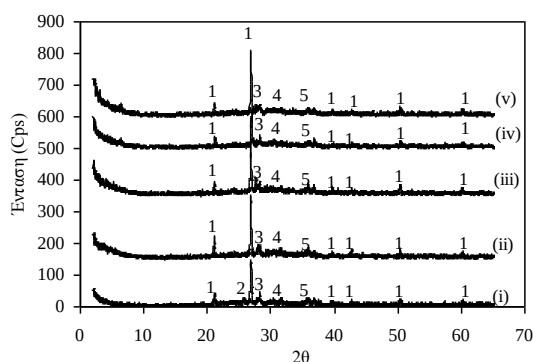


(α)

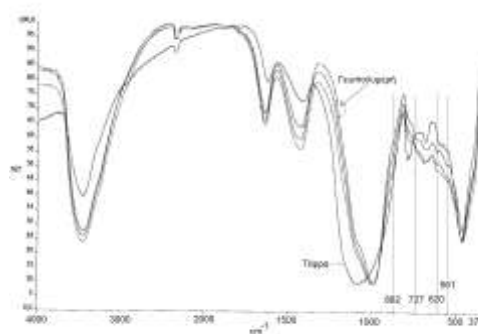


(β)

Σχήμα 1. (α) Επίδραση των συνθηκών ωρίμανσης (θερμοκρασία / χρόνος) των γεωπολυμερών στην αντοχή που αναπτύσσουν σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη και (β) τρόπος θραύσης γεωπολυμερών.



(α)



(β)

Σχήμα 2. (α) Διαγράμματα περιθλασιμετρίας ακτίνων X (i) ιπτάμενης τέφρας και (ii)-(v) παραγόμενων γεωπολυμερών, όπου διακρίνονται οι ορυκτολογικές φάσεις: (1) Quartz (SiO_2), (2) Anhydrite (CaSO_4), (3) Feldspars ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), (4) Gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) και (5) Maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

(β) Διάγραμμα φασματοσκοπίας υπερύθρου (IR) ιπτάμενης τέφρας και γεωπολυμερών υλικών.

Κατά το γεωπολυμερισμό της ιπτάμενης τέφρας λαμβάνουν χώρα σημαντικές μεταβολές, οι οποίες δεν είναι δυνατό να αποκαλυφθούν με περιθλασιμετρία ακτίνων X. Η εξέταση των υλικών με φασματοσκοπία υπερύθρου (IR) είναι πιο αποκαλυπτική. Στο Σχήμα 2(β) φαίνονται τα IR

διαγράμματα τόσο της ιπτάμενης τέφρας όσο και των παραχθέντων γεωπολυμερών. Διακρίνονται δύο περιοχές μέσα στις οποίες παρατηρούνται μεταβολές. Η πρώτη, αναφέρεται στη περιοχή κυματαριθμών μεγαλύτερων από 1300cm^{-1} που είναι τυπική περιοχή δονήσεων των δεσμών H-O-H και χαρακτηρίζει τη ποσότητα του ενδομημένου νερού στα στερεά. Η δεύτερη περιοχή, μεταξύ $400-300\text{cm}^{-1}$, είναι χαρακτηριστική περιοχή δονήσεων των δεσμών Si-O-Si, Al-O-Si και O-Si-O, χαρακτηρίζει δηλαδή υλικά πυριτικής και αργιλοπυριτικής σύστασης. Χαρακτηριστική μεταβολή είναι η μετατόπιση της ισχυρότερης κορυφής απορρόφησης στα 1085cm^{-1} που αναφέρεται σε ασύμμετρη έκταση δεσμών τύπου Si-O-Si και Al-O-Si προς τη περιοχή μικρότερων συχνοτήτων. Η μετατόπιση αυτή που είναι χαρακτηριστική στο γεωπολυμερισμό ιπταμένων τεφρών (Lee & Deventer 2003, Williams 1995) σχετίζεται με τη διάλυση του άμορφου υλικού της τέφρας από την ισχυρά αλκαλική φάση, γεγονός που είναι αναμενόμενο εφ' όσον το άμορφο υλικό διαλύεται ταχύτερα από το καλά κρυσταλλωμένο. Μεγάλες μεταβολές παρατηρούνται επίσης στη περιοχή $560-900\text{cm}^{-1}$, όπου εξαφανίζονται κορυφές που αναφέρονται σε έκταση δεσμών Si-O-Si (διάλυση άμορφου πυριτικού υλικού) και εμφανίζονται κορυφές που αναφέρονται σε δονήσεις δεσμών τύπου Si-O-H, Si-O-Si και Al-O-Si και αποδίδονται σε δημιουργία νέου υλικού αργιλοπυριτικής σύστασης (άμορφο ή κακώς κρυσταλλωμένο υλικό).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο γεωπολυμερισμός είναι μια νέα τεχνολογία, ραγδαία αναπτυσσόμενη τις τελευταίες δεκαετίες, η οποία μπορεί να μετατρέψει στερεά αργιλοπυριτικής σύστασης σε χρήσιμα υλικά για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών.

Ο σχηματισμός των γεωπολυμερών υλικών βασίζεται στην πολυσυμπύκνωση πολυμερικών αλυσίδων του τύπου -Si-O-Si-O- και -Si-O-Al-O-, οι οποίες δημιουργούνται κατά την ανάμειξη των στερεών αργιλοπυριτικών υλικών με αλκαλικά πυριτικά διαλύματα, υπό έντονα αλκαλικές συνθήκες. Καθώς οι πολυμερικές αλυσίδες πολυσυμπυκνώνονται για να σχηματίσουν τρισδιάστατα πολυμερικά πλέγματα, δεσμεύουν τα αδιάλυτα σωματίδια των στερεών υλικών και οδηγούν στο σχηματισμό στερεών υλικών με εξαιρετικές φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες.

Ο γεωπολυμερισμός μπορεί να συντελέσει αποτελεσματικά στη διαχείριση στερεών παραπροϊόντων αργιλοπυριτικής σύστασης που παράγονται από τη μεταλλευτική και μεταλλουργική βιομηχανία. Δοκιμές γεωπολυμερισμού της ιπτάμενης τέφρας που προέρχεται από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Μεγαλόπολης έδειξαν ότι είναι δυνατόν να παραχθούν δομικά υλικά με καλές μηχανικές ιδιότητες.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Cheng T.W. & Chiu J.P. 2003. Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, vol. 16, pp. 205-210.
2. Cioffi R. et al. 2003. Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue. *Resources Conservation & Recycling*, 2003 pp. 1-12.
3. Davidovits, J. 1988. Geopolymer Chemistry and Properties. *Geopolymer '88*, Proceed., pp. 25-48.
4. Davidovits, J. 1999. Chemistry and Geopolymeric Systems Terminology. *Geopolymer '99*, Proceed., pp. 9-40.
5. Lee W.K.W. & van Deventer J.S.J 2003. Use of Infrared Spectroscopy to study geopolymerization of heterogeneous amorphous aluminosilicates. *Langmuir*, pp. 8726-8734.

6. Phair J.W. & J.S.J. van Deventer 2002. Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. *Int. J. of Minerals Processing*, vol. 66, pp.121-143.
7. Stumm W. 1987. *Aquatic Surface Chemistry – Chemical Processes at the Particle-Water Interface*. John Willey & Sons, New York.
8. Stumm W. 1990. *Aquatic Chemical Kinetics – Reaction Rates of Processes in Natural Waters*. John Willey & Sons, New York.
9. Swanepoel, J.C. & Strydom, C.A. 2002. Utilization of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry*, vol. 17, pp. 1143-1148.
10. Van Jaarsveld, J.G.S et al. 1997. The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: Part I. Theory and applications. *Minerals Engineering*, vol. 10 (7), pp. 659-669.
11. Williams Q. 1995. Infrared, Raman and Optical spectroscopy of earth materials. *Mineral Physics and Crystallography-A handbook of physical constants*, pp.291-302.
12. Xu, H. & Van Deventer, J.S.J. 2000. The geopolymerization of alumino-silicate minerals. *Int. J. of Minerals Processing*, vol. 59, pp. 247-266.
13. Xu H. & Van Deventer J.S.J. 2003. The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars. *Colloids and Surfaces*, 2003 pp. 1-18.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΕΡΕΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΟΦΗΤΙΚΩΝ ΜΕΣΩΝ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Α. Παπανδρέου, Ε. Μπακέας, Κ.Γ. Στουρνάρας

ΕΚΕΠΥ ΑΕ 72 Km Εθνικής Οδού Αθηνών Λαμίας ΤΘ 18646 Χαλκίδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται οι τελευταίες εργασίες της ΕΚΕΠΥ ΑΕ γύρω από το κρίσιμο θέμα της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων. Σε συνεργασία με το ΕΜΠ και τρεις από τις μεγαλύτερες εταιρίες στον ελληνικό χώρο (S&B, ΔΕΗ, ΒΦΛ) επιχειρείται η επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων-παραπροϊόντων τους. Πιο συγκεκριμένα, με πρώτη ύλη ιπτάμενη τέφρα από την ΔΕΗ γίνεται ανάπτυξη και χαρακτηρισμός κεραμικών δομών που θα χρησιμοποιηθούν ως ροφητικά μέσα βαρέων μετάλλων από υγρά βιομηχανικά απόβλητα. Η μελέτη της ρόφησης γίνεται με την χρήση συνθετικών διαλυμάτων Cu(II), Pd(II), Cd(II), Zn(II) και Cr(III). Εξετάζεται η επίδραση στην ρόφηση παραγόντων όπως η ποσότητα του ροφητικού μέσου, η αρχική συγκέντρωση του μετάλλου και το pH του διαλύματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν πολύ καλές τιμές απομάκρυνσης των παραπάνω μετάλλων. Στην παρούσα φάση γίνεται η μοντελοποίηση της προσρόφησης των μετάλλων στις κεραμικές δομές. Επίσης γίνεται μελέτη της δυνατότητας αξιοποίησης των απορριμμάτων συνθετικής γύψου που παράγεται κατά την αποθείωση των καυσαερίων σε μονάδες της ΔΕΗ. Η γύψος μετά από μερική αφυδάτωσή μετατρέπεται σε ιδιαίτερα δραστικό ημιυδρίτη. Ταυτόχρονα έχει επιτευχθεί η ενεργοποίηση-ενυδάτωση του ανυδρίτη φθοριογύψου (παραπροϊόν κατά την παραγωγή υδροφθορίου). Μετά την προσθήκη ενεργοποιητή ο ανυδρίτης σε μεγάλο ποσοστό μετατρέπεται σε γύψο. Σε εξέλιξη είναι μελέτη της δυνατότητας χρήσης των υλικών αυτών για την παραγωγή αυτοεπιπεδούμενων δαπέδων, υλικών επίστρωσης δρόμων και κονιαμάτων. Τέλος μελετάται η δυνατότητα ανάπτυξης πυρίμαχων προϊόντων με πρώτη ύλη απορρίμματα περλίτη από την S&B. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα υλικά αυτά είναι χαμηλής πυριμαχικότητας, ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συνδέτες πυρίμαχων τούβλων αλλά και για την παρασκευή πυρότουβλων ή πυρίμαχων μαζών που θα χρησιμοποιηθούν ως μονωτικοί μανδύες σε πυρίμαχες επενδύσεις.

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, προσρόφηση βαρέων μετάλλων, περλίτης, πυρίμαχα, ανυδρίτης, αυτοεπιπεδούμενα δάπεδα

UTILIZATION OF INDUSTRIAL SOLID WASTES FOR THE DEVELOPMENT OF ADSORPTION MEANS AND CONSTRUCTION MATERIALS

A. Papandreou, E. Bakeas, C. Stournaras

CERECO S.A. 72nd Km National road Athens – Lamia PO BOX:18646 Halkida

ABSTRACT: In the present study is presented the work of CERECO SA in the very critical area of solid waste management. In corporation with NTUA and three of the biggest companies in Greece (S&B, PPCG and PFI) the study has been focused on the reutilization of their byproducts that are produced in huge quantities annually. By using fly ash from PPCG as raw material ceramic structures have been developed in order to used as adsorbative means of heavy metals from industrial effluents. These structures have been tested as sorbents of Cu (II), Cd(II), Pb(II) and Cr(III) ions from aqueous solutions. The effect on the metal removal of the quantity of adsorbative mean, the initial metal concentration and the pH has been studied. Results show good adsorption properties for the produced structures. Also the hydration-activation of anhydrite (by product of the hydrofluoric acid by PFI) has been studied. After activation a high percent of anhydrite can be hydrated and transformed into gypsum. Studies about the potential of development mortars, road substrates and mainly self-leveling floors are now in progress. Finally the development of refractory product by using as raw material perlite wastes has been studied. Results show that these materials are low refractoriness materials. However such materials can be used as bonding agents for development of refractory units or in the production of custables refractories that could be used as insulation.

Keywords: solid waste management, fly ash adsorption, anhydrite activation, perlite

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια όλο και πιο συχνά τίθεται το θέμα της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων και πολύ περισσότερων των αποβλήτων που χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα ή τοξικά σύμφωνα με τον αντίστοιχο κατάλογο της ευρωπαϊκής ένωσης [4]

Στο γενικότερο σημερινό πλαίσιο της διαχείρισης των αποβλήτων μεγάλες εταιρίες σε μια προσπάθεια να συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος αλλά και να αποφύγουν τυχόν επιβολή σημαντικών χρηματικών προστίμων, έχουν ενεργοποιηθεί προς την κατεύθυνση της επαναχρησιμοποίησης των παραπροϊόντων τους.

Στην παρούσα εργασία η ΕΚΕΠΥ σε συνεργασία με τρεις από τους μεγαλύτερους βιομηχανικούς φορείς της Ελλάδας καθώς και την σχολή ΜΜ-ΜΜ ΕΜΠ επιχειρεί την ανάπτυξη προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας από απορρίμματα περλίτη (S&B ΑΕ) ιπτάμενης τέφρας (ΔΕΗ) και φθοριογύψο (ΒΦΛ ΑΕ).

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΑΠΟ ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ ΚΑΙ ΡΟΦΗΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ ΑΠΟ ΥΔΑΤΙΚΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ

Υλικά

Η ιπτάμενη τέφρα παράγεται κατά την καύση του λιγνίτη στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ στην Πτολεμαΐδα και στη Μεγαλόπολη. Η ετήσια παραγωγή ιπτάμενης τέφρας της ΔΕΗ είναι 8.500.000 t/έτος. Διεθνώς γίνονται μελέτες για την χρήση της ιπτάμενης τέφρας τόσο ως δομικό υλικό αλλά πρόσφατα κι ως ροφητικό μέσο για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων κι οργανικών ρύπων από υδατικά διαλύματα.[1, 2, 5, 6, 7]

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται:

ITM: Ιπτάμενη τέφρα από τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης λειοτριβημένη σε βιομηχανικό μύλο σε μέγεθος $-90\mu\text{m}$.

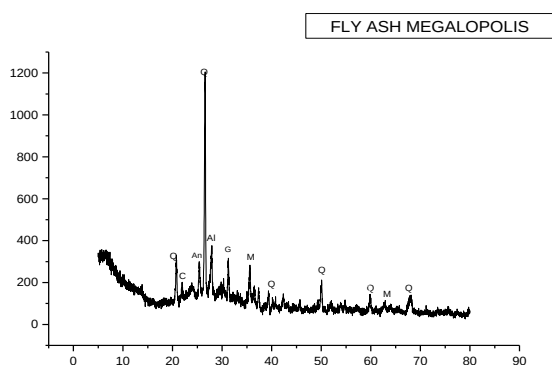
Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης

Το κύριο συστατικό της ιπτάμενης τέφρας από την Μεγαλόπολη είναι πυρίτιο (χημική ανάλυση πίνακας 1) από την ορυκτολογική ανάλυση του υλικού ατού προκύπτει ότι κύρια φάση είναι χαλαζίας ενώ άλλες φάσεις παρούσες είναι οξειδίο του ασβεστίου, χριστοβαλίτης, ανυδρίτης CaSO_4 , μαγκεμίτης, γελενίτης, και αλβίτης.. Από την μορφολογική ανάλυση του υλικού προκύπτει ότι η ιπτάμενη τέφρα αποτελείται από σφαιρικά, οβάλ και ακανόνιστου σχήματος σωματίδια τα οποία φέρουν συντήξεις στην εξωτερική του επιφάνεια (Εικ 1).

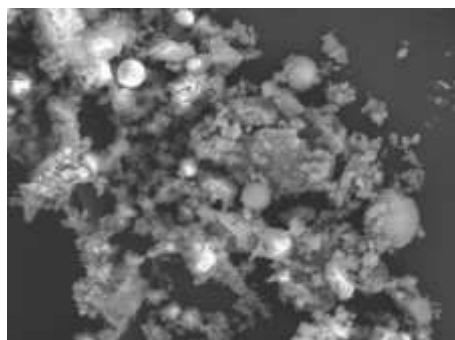
Πίνακας 1 χημική ανάλυση ITM

SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	LOI
48,21	18,16	12,87	9,40	4,18	1,63	0,65	1,20	1,28

Διάγραμμα 1: ορυκτολογική ανάλυση ITM



Εικόνα 1: μορφολογία ITM (SEM)



Q: quartz SiO_2 , A: anorthoclase $\text{Na}_{0,71}\text{K}_{0,29}\text{AlSi}_3\text{O}_8$, Al: Albite $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, An: Anhydrite CaSO_4 , CaO: lime, G: gehlenite $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ M: maghemite Fe_2O_3

Ανάπτυξη κεραμικών δομών και ρόφηση

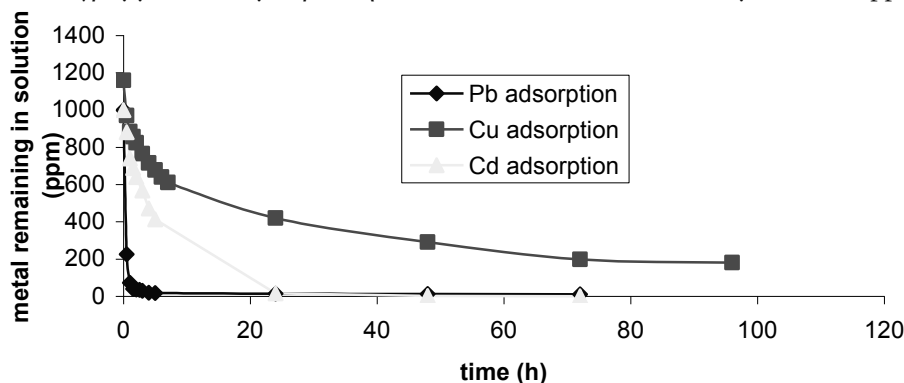
Έχει μελετηθεί η δυνατότητα ανάπτυξης κεραμικών δομών από λειοτριβημένη ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης. Η τέφρα μορφοποιήθηκε με την μέθοδο της πελετοποίησης χωρίς την προσθήκη κανενός άλλου συνδετικού υλικού, παρά μόνο με την χρήση νερού. Η πελετοποίηση έλαβε χώρα σε εργαστηριακού τύπου πελλετομηχανή στις εγκαταστάσεις της ΕΚΕΠΥ. Έχει βρεθεί ότι οι καλύτερες συνθήκες ανάπτυξης στην συγκεκριμένη μηχανή είναι :

- Γωνία τυμπάνου μηχανής 35°
- Λόγος ιπτάμενης τέφρας / νερό = 3,16

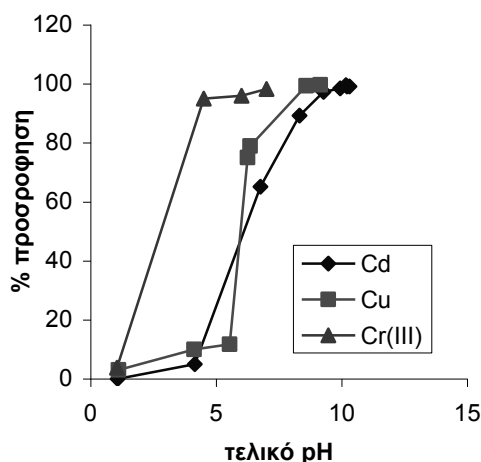
Μετά την ανάπτυξη τους τα πέλλετς παραμένουν υπό σταθερή θερμοκρασία και υγρασία προκειμένου να αναπτυχθεί ο υδραυλικός δεσμός. Μετά το πέρας αυτού του χρονικού διαστήματος λαμβάνονται δομές σταθερές με καλές μηχανικές ιδιότητες οι οποίες κοσκινίζονται ώστε τελικά να ληφθούν δομές με διάμετρο 0,5-1,0 cm.

Τα πέλλετς αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα ρόφησης για την απομάκρυνση ιόντων Cu(II) , Cd(II) και Cr(III) από υδατικά διαλύματα. Στο διάγραμμα 2 φαίνεται η προσρόφηση ιόντων Cu(II) , Cd(II) Pb(II) από υδατικά τους διαλύματα με αρχική συγκέντρωση 1000ppm.. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση του pH στην ρόφηση κάθε μετάλλου ξεχωριστά (διάγρ 3). Τέλος προσδιορίστηκε για κάθε μέταλλο η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να προσροφηθεί στο pH που παρατηρείται κάθε φορά μέγιστη ρόφηση κάθε μετάλλου (διάγρ 4).

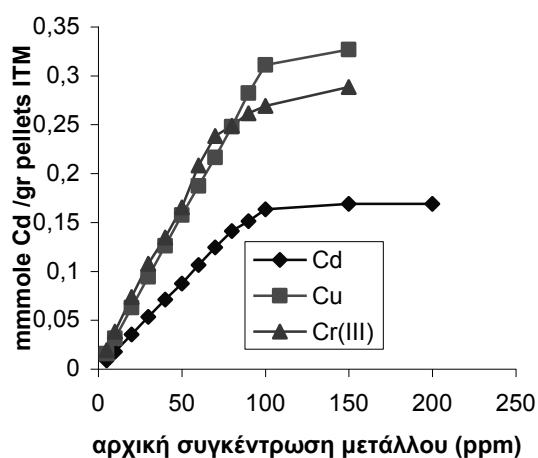
Διάγραμμα 2: Απομάκρυνση Cu, Pb, Cd από υδατικά διαλύματα 1000 ppm



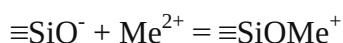
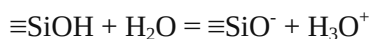
Διάγραμμα 4: % προσρόφηση-pH



Διάγραμμα 3: Μέγιστη ποσότητα προσροφόμενου μετάλλου



Η προσρόφηση μπορεί να περιγραφεί από το εξής γενικό σχήμα, όπου όπως φαίνεται κύριο ρόλο έχει το πυρίτιο, αφού είναι κι το κύριο συστατικό της ιπτάμενης τέφρας [11, 12]



επίσης οι αλουμινικές και σιδηρούχες φάσεις όπου οι ενεργές θέσεις μπορούν αν παρασταθούν ως $\equiv\text{SOH}$ συνεισφέρουν επίσης στην ρόφηση σύμφωνα με το παραπάνω γενικό σχήμα.

Αποτελέσματα

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας ως υλικό για την ανάπτυξη ροφητικών δομών βαρέων μετάλλων δείχνει ότι είναι πολύ αποτελεσματική. Λαμβάνονται σταθερές δομές που μπορούν εύκολα και με μικρό κόστος να παρασκευαστούν και μετά τον κορεσμό τους να απομακρυνθούν από το διάλυμα.

Οι δομές μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά ως και 0,33 mmole Cu(II)/g pellet σε pH=9, 0,18 mmole Cd/g pellet σε pH=8,5 και 0,28mmole Cr(III)/g pellet σε pH=5. Συνεχίζονται οι μελέτες για τον προσδιορισμό των μέγιστων ποσοτήτων απομάκρυνσης από τα πέλλετς σε Pb και Zn καθώς και για την πειραματική απόδειξη του προτεινόμενου μηχανισμού. Παράλληλα γίνεται θεωρητική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με σκοπό την μοντελοποίηση του φαινομένου.

Συμπεράσματα

- Η ιπτάμενη τέφρα από την Μεγαλόπολη μπορεί εύκολα να μορφοποιηθεί σε κεραμικές δομές με την μέθοδο της πελετοποίησης
- Τα πέλλετς από ιπτάμενη τέφρα δρουν αποτελεσματικά ως ροφητικά μέσα βαρέων μετάλλων από υδατικά διαλύματα.

- Η ρόφηση εξαρτάται από το pH του διαλύματος και έχουν προσδιοριστεί οι μέγιστες ποσότητες που μπορούν να απομακρυνθούν για κάθε μέταλλο.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΓΥΨΟΥ

Υλικά

Τα απορρίμματα γύψου είναι: α)συνθετικός ανυδρίτης που παράγεται σαν παραπροϊόν της διεργασίας παραγωγής υδροφθορικού οξέος στην Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων σε ποσότητες περίπου 25.000 t/έτος β)συνθετική γύψος που παράγεται στο θερμοηλεκτρικό σταθμό της ΔΕΗ στη Μεγαλόπολη, σαν παραπροϊόν της διεργασίας αποθείωσης των θερμών αερίων από την καύση του λιγνίτη. Έχουν αναφερθεί προσπάθειες ενεργοποίησης ου ανυδρίτη για την χρήση του ως δομικό υλικό στην παρασκευή κονιαμάτων και δαπέδων αλλά και ως πρόσθετο στο τσιμέντο [8, 10].

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται το εξής παραπροϊόν γύψου:

- ΒΦΛ 3: ανυδρίτης γύψου εξουδετερωμένος αλεσμένος

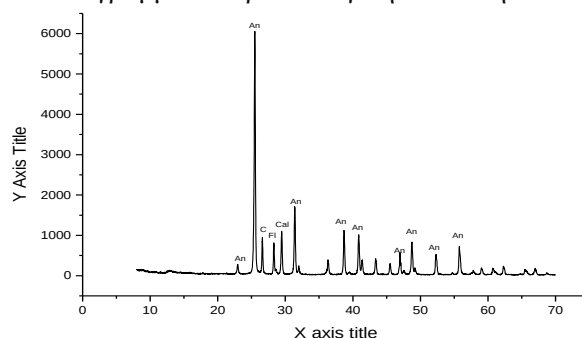
Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός παραπροϊόντων γύψου

Η χημική και ορυκτολογική ανάλυση των απορριμμάτων ανυδρίτη φθοριογύψου δείχνει ότι κύριο συστατικό του υλικού αυτού είναι ο ανυδρίτης του CaSO_4 ενώ η παρουσία άλλων στοιχείων είναι σε χαμηλά ποσοστά.

Πίνακας 2: Χημική ανάλυση ΒΦΛ

SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	SO_4^{2-}	LOI
0,50	0,86	38,37	0,86	0,86	0,32	0,18	48,10	2,88

Διάγραμμα 5: Ορυκτολογική ανάλυση ΒΦΛ3



An; Anhydrite , Cal: calcite CaCO_3 , Fl: Fluorite: CaF_2 ,

Ενεργοποίηση-ενυδάτωση ανυδρίτη γύψου ΒΦΛ

Η ενεργοποίηση-ενυδάτωση της φθοριογύψου γίνεται με την χρήση K_2SO_4 και Na_2SO_4 ως ενεργοποιητών. Γίνονται δοκίμια με την προσθήκη ενεργοποιητή και H_2O σε ποσοστό 35%. Τα αποτελέσματα ορυκτολογικών (διάγρ 7, 9) και θερμοβαρυτομετρικών αναλύσεων (διάγρ 6, 8) στο αρχικό υλικό καθώς και στο ενεργοποιημένο σε διάφορα στάδια ωρίμανσης δείχνουν καθαρά την

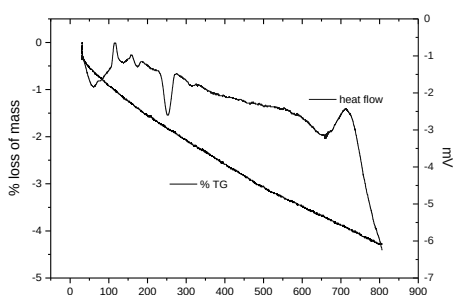
ενεργοποίηση. Ενώ στο αρχικό υλικό δεν υπάρχει καμία απώλεια βάρους όπως προκύπτει από την θερμοβαρτομετρική ανάλυση (διάγρ 6) ούτε και καμία παρουσία φάσης ένυδρου θεικού ασβεστίου όπως προκύπτει από την ορυκτολογική ανάλυση (διάγρ 7) στο προϊόν μετά-την ενεργοποίηση με προσθήκη 1% K_2SO_4 είναι φανερή η απώλεια βάρους στη θερμοκρασία των 180-215 °C (διάγρ 9) η οποία μαρτυρά την παρουσία $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ που βεβαιώνεται με την ορυκτολογική ανάλυση (διάγρ 8) του ενεργοποιημένου ανυδρίτη

Η αντίδραση ενυδάτωσης εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου. Ο μηχανισμός ενυδάτωσης που προτείνεται περιλαμβάνει το σχηματισμό διπλών ενδιάμεσων αλάτων μεταξύ ενεργοποιητή και του ανυδρίτη. Με τον τρόπο αυτό «ανοίγει» το κρυσταλλικό πλέγμα του ανενεργού $CaSO_4$ και επιτυγχάνεται τελικά η ενυδάτωσή του σε $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ [9]. Ο ενεργοποιημένος ανυδρίτης θα χρησιμοποιηθεί σε μελέτες για την ανάπτυξη μειγμάτων αυτοεπιπεδούμενων δαπέδων σε συνδυασμό με κατάλληλα πρόσμικτα-ρευστοποιητές, αλλά και για την παρασκευή κονιαμάτων.

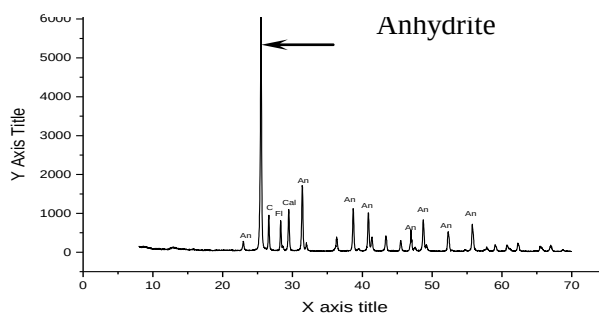
Συμπεράσματα

Η φθοριογύψος ενεργοποιείται με την χρήση θεικών αλάτων K και Na. Το ποσοστό της ενεργοποίησης εξαρτάται από το είδος του θεικού άλατος καθώς και την ποσότητα του ενεργοποιητή. Τα πιο πάνω αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι εφικτή η προσθήκη του ανυδρίτη αυτού σε συνδυασμό με τον κατάλληλο ενεργοποιητή σε συνθέσεις αυτοεπιπεδούμενων δαπέδων. Σε εξέλιξη είναι μελέτες για την ανάπτυξη αυτού του είδους συνθέσεων με βάση το υλικό αυτό.

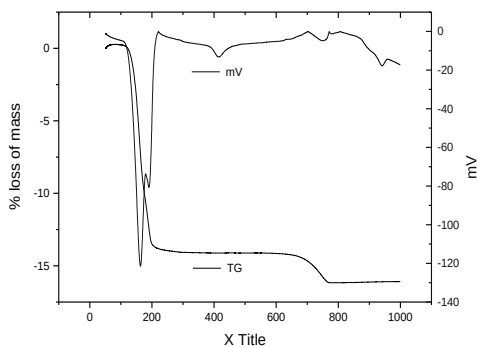
Διάγραμμα 6 TG-DTA φθοριογύψου



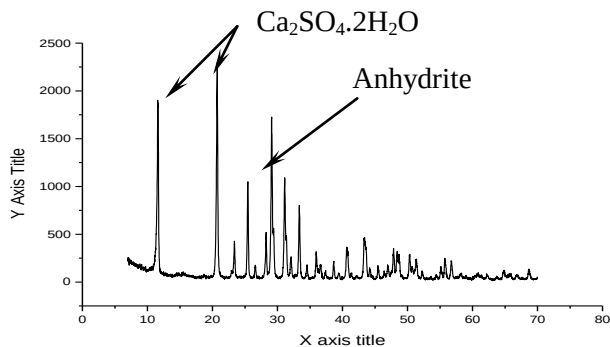
Διάγραμμα 7:ορυκτολογική ανάλυση ΒΦΛ 3 ως έχει



Διάγραμμα 5: TG-DTA BFL3+1% K_2SO_4 38 ημέρες



Διάγραμμα 9: XRD BFL3+1% K_2SO_4 38 ημέρες



ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΥΡΙΜΑΧΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ S&B1 ΚΑΙ S&B2

Υλικά

Ο εξορυσσόμενος περλίτης κατεργάζεται, θραύεται, ξηραίνεται, κοσκινίζεται και στη συνέχεια διογκώνεται με στόχο να αποκτήσει υψηλό πορώδες και θερμομονωτικές/ ηχομονωτικές ιδιότητες, τις οποίες εκμεταλλεύονται διάφοροι κλάδοι της βιομηχανίας. Κατά την παραγωγή των προϊόντων περλίτη από την S&B στις μονάδες της Μήλου συνπαράγονται 150-200.000 t/έτος λεπτομερών κλασμάτων, τα οποία απορρίπτονται παρά το γεγονός ότι είναι επεξεργασμένοι περλίτες.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται χρήσεις του περλίτη σε σκυρόδεμα αλλά και ως ελαφροβαρές αδρανές [3, 13]

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται οι εξής περλιτικές απορρίψεις:

- S&B 1: Συμπαράγόμενο περλιτικό υλικό με υγρασία 3-9 % και κοκκομετρία 2/0 mm
- S&B 2: Υπέρλεπτη απόρριψη (-90 μm)

Φυσικοχημικός χαρακτηρισμός υλικών S&B

Από τα αποτελέσματα της χημικής και της ορυκτολογικής ανάλυσης (πίνακας 1, Σχ 1) προκύπτουν τα εξής. Το απόρριμμα περλίτη S&B 1 είναι ένα κρυσταλλικό πυριτικό υλικό όπου κύρια φάση είναι ο χαλαζίας (quartz). Το S&B 2 είναι άμορφο πυριτικό υλικό με περιεκτικότητα σε SiO₂ 72 %.

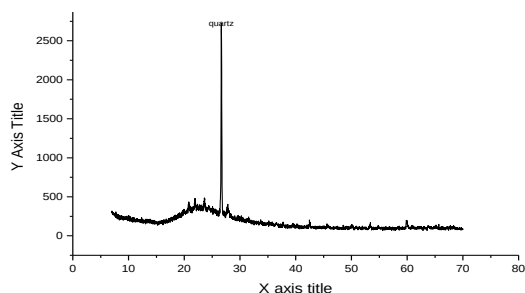
Ανάπτυξη πυρίμαχων μαζών από απορρίμματα S&B

Στη φάση αυτή έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την αξιοποίηση των περλιτικών υλικών ως πρώτες ύλες για την παραγωγή πυρίμαχων συνθέσεων. Έγινε μια πρώτη εκτίμηση της πυριμαχικότητας των υλικών της S&B. Δημιουργήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια στα οποία ελέγχθηκε η συμπεριφορά τους σε θερμοκρασίες 900°, 1050° και 1200° C. Όλα τα δοκίμια εμφάνισαν υαλοποίηση και αποδόμηση στη θερμοκρασία των 1200°C.

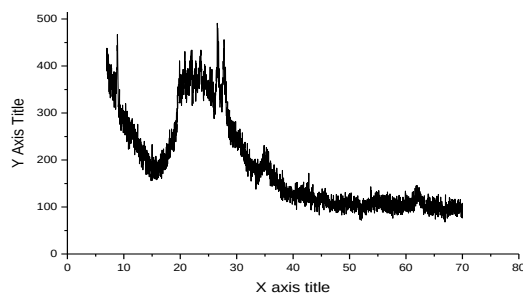
Πίνακας 3: χημική ανάλυση υλικών S&B

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
S&B 1	74,59	13,10	1,56	1,12	0,24	0,10	2,22	3,27	3,00
S&B 2	71,84	14,09	1,38	1,25	0,85	0,10	3,09	2,75	3,86

Διάγραμμα 7: Ορυκτολογική ανάλυση S&B 1



Διάγραμμα 6: ορυκτολογική ανάλυση S&B 2



Τα δοκίμια που δημιουργήθηκαν με το υλικό S&B 2 εμφάνισαν έντονη συρρίκνωση από την θερμοκρασία των 1050 °C (γραμμική συρρίκνωση -23,7). Στη θερμοκρασία των 900 °C το S&B 2 μικρή συρρίκνωση (-2,5 %).

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η πυριμαχικότητα των παραπάνω υλικών είναι περιορισμένη και αφορά κυρίως σε θερμοκρασιακή περιοχή που φτάνει έως τους 1000 °C.

Στη συνέχεια έχουν χρησιμοποιηθεί τα περλιτικά υλικά ως συνδέτης («κόλλα») σε συνδυασμό με άλλες αργιλοπυριτικές πρώτες ύλες. Τα πυρίμαχα τούβλα που αναπτύχθηκαν είχαν μικρή περιεκτικότητα σε περλιτικό υλικό ώστε να αποφευχθούν τα παραπάνω προβλήματα. Οι συνθέσεις που έγιναν των φαίνονται στον πίνακα 4. Έχει επίσης γίνει και η ανάπτυξη μια πυρίμαχης μάζας χωρίς την προσθήκη περλίτη που χρησιμοποιήθηκε ως προϊόν αναφοράς (σύνθεση Α). Στις συνθέσεις Β-Δ ελέγχεται η συμπεριφορά των απορριμμάτων περλίτη ως κόλλα σε σχέση με το Na_2SiO_3 . Στη συνέχεια (συνθέσεις Ε-ΣΤ) εξετάζεται η επίδραση της αύξησης της ποσότητας του περλιτικού (S&B 2) υλικού διατηρώντας την ποσότητα του πυρίμαχου τσιμέντου σταθερή (20 %), ενώ στις συνθέσεις Η-Ι μελετάται η επίδραση της αύξησης του περλιτικού υλικού S&B 2 στις αντοχές των τούβλων με ταυτόχρονη μείωση του πυρίμαχου τσιμέντου.

Αποτελέσματα- Συμπεράσματα

Όπως προκύπτει από τα πειράματα η υποκατάσταση του συνδετικού υλικού σε πυρίμαχα τούβλα με απορρίμματα περλίτη S&B 2 είναι δυνατή. Από τα διαγράμματα αντοχών (διάγρ 12 & 13) οι συνθέσεις Γ και Δ στις οποίες το Na_2SiO_3 έχει υποκατασταθεί με S&B 2 και S&B 1 αντίστοιχα δίνουν αντοχές παραπλήσιες με το τούβλο αναφοράς A_{ref} . Επίσης πολύ καλή συμπεριφορά ως προς τις αντοχές σε θλίψη δείχνει και η σύνθεση Ι όπου το υλικό S&B 2 υποκαθιστά ποσότητα πυρίμαχου τσιμέντου σε ποσοστό 9 %. Περαιτέρω δοκιμές είναι σε εξέλιξη προκειμένου να αναπτυχθούν και πυρίμαχες μάζες που θα χρησιμοποιηθούν ως μανδύες.

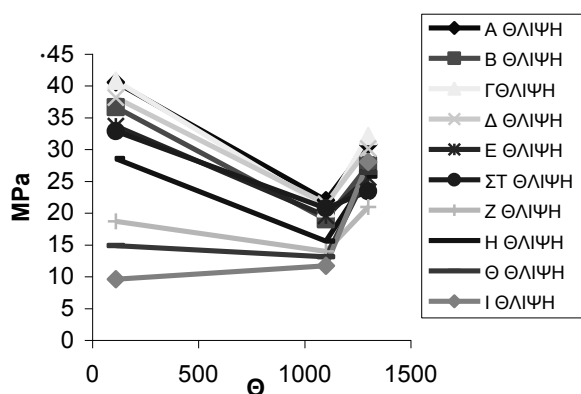
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα απορρίμματα-παραπροϊόντα τριών από τους μεγαλύτερους βιομηχανικούς φορείς στην Ελλάδα μελετήθηκαν ως πρώτες ύλες στην παραγωγή νέων προϊόντων. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης φανερώνουν ξεκάθαρα πως η αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων όχι μόνο είναι εφικτή αλλά πολύ περισσότερο σήμερα είναι επιβεβλημένη τόσο για λόγους προστασίας του ήδη βεβαρημένου περιβάλλοντος όσο και για οικονομικούς λόγους. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η επαναχρησιμοποίηση των παραπροϊόντων αυτών μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή νέων προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας.

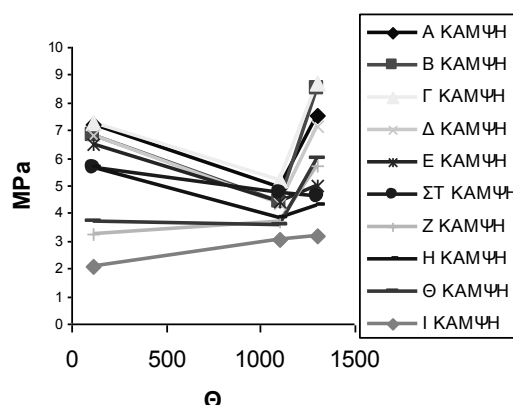
Από τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής φαίνεται ότι με πρώτη ύλη την ιπτάμενη τέφρα από την Μεγαλόπολη μπορούν να αναπτυχθούν δομές με την δυνατότητα να απομακρύνουν βαρέα μέταλλα από υδατικά διαλύματα και κατ'επέκταση από βιομηχανικά απόβλητα. Επίσης τα απορρίμματα συνθετικής γύψου μπορούν μετά από κατάλληλη ενεργοποίηση τους να αναπτύξουν υδραυλικές ιδιότητες και να χρησιμοποιηθούν σε συνθέσεις αυτοεπιπεδούμενων δαπέδων και κονιαμάτων. Η μελέτη αυτή βρίσκεται τώρα σε εξέλιξη και τα πρώτα αποτελέσματα ήδη είναι πολύ θετικά. Τέλος φάνηκε ότι η προσθήκη απορριμμάτων περλίτη σε πυρίμαχες συνθέσεις ως συνδετικό υλικό έχει θετική επίδραση στις αντοχές των προϊόντων. Σε εξέλιξη είναι η μελέτη και νέων συνθέσεων πυρίμαχων τούβλων και επενδύσεων όπου ακόμη μεγαλύτερες ποσότητες περλιτικών απορρίψεων θα μπορούν να αξιοποιηθούν.

Πίνακας 4: συνθέσεις χυτών πυρίμαχων μαζών με προσθήκη περλιτικών απορρίψεων S&B

	A (ref)	B	Γ	Δ	E	ΣΤ	Z	H	Θ	I
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Chammote 44 (1-3)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
1-3	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
0,5-1	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
0-0,3	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
0-0,1	15	12	12	12	10	5	--	15	15	15
πυρίμαχο τσιμέντο		20	20	20	20	20	20	17	14	11
Na ₂ SiO ₃		3	--	--	--	--	--	--	--	--
S&B 2		--	3	--	5	10	15	3	6	9
S&B 1		--	--	3	--	--	--	--	--	--
H ₂ O		12,80	12,80	12,80	13,30	14,30	16,30	13,00	13,80	14,80



Διάγραμμα 9: Αντοχές σε θλίψη χυτών πυρίμαχων μαζών



Διάγραμμα 8: Αντοχές σε κάμψη χυτών πυρίμαχων μαζών

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Allemany L. J. et al, (1996) Removal of phenol from aqueous solutions by adsorption onto coal fly ash, *Adsorpt. Sci. Technology*, Vol 13 (6), pp.527-536.
2. Apak, R., E. Tutem, M. Hungal and J. Hizal, (1998), Heavy metals cation retention by unconventional sorbents (Red mud and fly ashes), *Wat. Res*, Vol 32, (2), pp. 430-440.
3. Demirboga R. and. Gul R. (2003) The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight aggregate *Cem. and Conc. Res.* Vol. 33 (5) pp.723-727.
4. Εφημερίδα της κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας (1997) ΦΕΚ 604 τεύχος Β Αριθμός 19396/1546 Μέτρα και όροι για την διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων.
5. Gupta G and Torres N.(1998), Use of fly ash in reducing toxicity of and heavy metals in

wastewater effluent, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.57 ,pp 243-248.

6. Kao, P.-C. and J.-H. Tzeng, (2000). Removal of chlorophenols from aqueous solutions by fly ash, *J. of Hazard. Materials*, Vol. 76, pp.237-249.
7. Papandreou A, C. J. Stournaras and Papias D. (2004) New non-conventional sorbents from fired coal fly ash, *Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology*, Hania Crete, Greece.
8. Pera J. and Ambroise J. (2004) New applications of sulfoaluminate cement *Cem. and Conc. Res* Vol 34 pp. 671-676.
9. Singh M. and Garg M.(1995) Activation of gypsum anhydrite-slug mixtures *Cem. and Conc. Res* Vol25 (2) pp332-338.
10. Smadi M. M. Haddad R. H. Akour A. M. (1999) Potential use of phosphogypsum in concrete *Cem. and Conc. Res* Vol 29 pp 1419-1425.
11. Smith K. S., Ranvile J. F., Plumlee G. S. and Macalady D. L. (1998). Predictive double –layer modeling of metal sorption in mine-drainage systems. In *Adsorption Metals by Geomedia Variables, Mechanisms and Model Applications*, ed. Jenne E.A.,Academic Press, San Diego, CA, USA.
12. Stumm W. (1992) *Chemistry of the Solid-Water Interface* John Wiley & Sons, New York.
13. Yu L. H. Ou H. Lee L. L.(2003) Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete *Cem. and Conc. Res.* Vol 33 (1) pp73-77.

ΑΛΛΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΛΟΙΠΩΝ ΒΩΞΙΤΗ

Δ. Μπουφούνος, Δ. Φαφούτης, Η. Περνιεντάκη

*«Αλουμίνιον της Ελλάδος», 32003 Άγιος Νικόλαος Βοιωτία, dimitri.boufounos@alhellas.gr, τηλ.
2267 0 49200*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η έρευνα για την αξιοποίηση των καταλοίπων βωξίτη (KB), που προκύπτουν από την επεξεργασία με τη μέθοδο Bayer για την παραγωγή αλουμίνας, επεκτείνεται και σε άλλους τομείς πέραν αυτού των δομικών υλικών (τσιμέντο, τούβλα, κεραμίδια). Ικανοποιητικά αποτελέσματα έχουν δώσει μέχρι στιγμής δοκιμές που έχουν γίνει στην οδοποιία για την κατασκευή επιχωμάτων – υποστρωμάτων, στην επικάλυψη για την ενδιάμεση ή τελική αποκατάσταση χώρων απόθεσης αστικών ή βιομηχανικών αποβλήτων, στην δημιουργία εδαφικών καλυμμάτων προς δένδροφύτευση σε χώρους προς αποκατάσταση, στον εμπλουτισμό υποβαθμισμένων ή απερημοποιημένων ή αλατούχων εδαφών. Ακόμη, σε εξέλιξη είναι η έρευνα για τη χρήση KB προς πλήρωση εγκαταλελειμμένων επιφανειακών μεταλλείων βωξίτη με στόχο την αποκατάστασή τους.

Λέξεις κλειδιά: κατάλοιπα βωξίτη

OTHER USES OF BAUXITE RESIDUE

D. Boufounos, D. Fafoutis, I. Pernientaki

*«Aluminium de Grece», 32003 St Nicolas Viotia, dimitri.boufounos@alhellas.gr,
tel. +30 2267 0 49200*

ABSTRACT: The research for the use of bauxite residue (BR), produced during the alumina refining is extended to others areas beyond the constructions materials (cement, bricks, tiles). Tests performed on road base construction, on landfill top and bottom sealing, on land reclamation, on soil improvement, have given so far satisfying results. Furthermore, the research for the use of bauxite residue for the rehabilitation of abandoned surface bauxite mines is under development.

Keywords: bauxite residue

ΟΔΟΠΟΙΑ - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ – ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Οι έρευνες , τις οποίες επί σειρά ετών διεξάγει το Εργαστήριο Οδοποιίας- Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θεσσαλονίκης σχετικά με τις προοπτικές χρησιμοποίησης ΚΒ σε οδικές κατασκευές , κατέληξαν σε ορισμένες μελέτες σύνθεσης για πιλοτική εφαρμογή (1).Στα πλαίσια αυτής της εφαρμογής , κατασκευάστηκε δρόμος μήκους 100μ ύψους 2μ και σύνθετης διατομής για την μελέτη της συμπεριφοράς γεωκατασκευών με χρήση των ΚΒ και σύγκριση με συμβατικές τεχνικές. Η κατασκευή πραγματοποιήθηκε στον ευρύτερο χώρο των εγκαταστάσεων της «Αλουμίνιον της Ελλάδος» και συγκεκριμένα στον δρόμο που οδηγεί στους χώρους απόθεσης στερεών βιομηχανικών αποβλήτων της.

Ο δρόμος αποτελείται από 3 διακριτές διατομές η σύσταση των οποίων είναι η εξής :

Α) Διατομή 1 : Έδαφος της περιοχής

Β) Διατομή 2 : Έδαφος της περιοχής (60%) και ΚΒ (40%)

Γ) Διατομή 3 : Μίγμα ΚΒ (96%) και ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό 4%



Φωτογραφία 1. Δρόμος

Ως οδόστρωμα χρησιμοποιήθηκε μία μικρού πάχους αμμοχαλικώδης επίστρωση και το έργο παραδόθηκε στην κυκλοφορία. Δύο χρόνια μετά, η οδική κατασκευή δεν έχει παρουσιάσει σημαντικές φθορές, παραμορφώσεις ή ολισθήσεις πρανών και το τεχνικό αυτό εγχείρημα μπορεί να θεωρηθεί ως μία μεγάλη επιτυχία, δεδομένου ότι ελάχιστες παρόμοιες κατασκευές αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία και ακόμη λιγότερες με ανάλογα θετικά αποτελέσματα. Το εργαστήριο

Οδοποιίας του Α.Π.Θ συντάξε Υπόμνημα Τεχνικών Οδηγιών για την κατασκευή επιχωμάτων σταθεροποιημένων με ΚΒ (2).



Φωτογραφία 2. Δρόμος

ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΦΡΑΓΜΟΣ ΣΤΟΝ ΠΥΘΜΕΝΑ Η ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΧΩΡΩΝ ΑΠΟΘΕΣΗΣ ΑΣΤΙΚΩΝ Η ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Σύμφωνα με την Η.Π. 29407/3508 (ΦΕΚ 1572/16-12-2002) “Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων” και το Παράρτημα Ι-Γενικές απαιτήσεις για όλες τις κατηγορίες ΧΥΤΑ (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων) προβλέπεται, για την προστασία του εδάφους και των υπογείων και επιφανειακών υδάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και ανάλογα με την περίπτωση, η εφαρμογή συνδυασμού γεωλογικού φραγμού και στεγανής μεμβράνης για την στεγανοποίηση πυθμένα και την επιφανειακή στεγανοποίηση. Τα κατάλοιπα βωξίτη όταν περιέχουν τη βέλτιστη κατά Proctor υγρασία (28,38% κατά βάρος σε ξηρή βάση) και συμπιεστούν κατάλληλα ώστε να αποκτήσουν το μέγιστο ξηρό φαινόμενο βάρος ($1,506 \text{ g/cm}^3$), παρουσιάζουν πολύ χαμηλή υδροπερατότητα με συντελεστή K ίσο με $4,6 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$. Η τιμή αυτή της υδροπερατότητας των καταλοίπων βωξίτη είναι μεγαλύτερη της τιμής $K: 10^{-9} \text{ m/sec}$, που ορίζεται με την υπ’ αριθμόν Η.Π. 29407/3508 για ΧΥΤ μη επικίνδυνων και επικίνδυνων αποβλήτων, ενώ είναι πολύ μικρότερη της αντίστοιχης τιμής ($K: 10^{-7} \text{ m/sec}$) για ΧΥΤ αδρανών αποβλήτων. Παρά το γεγονός ότι τα κατάλοιπα βωξίτη παρουσιάζουν συντελεστική υδροπερατότητας μεγαλύτερο από το συντελεστή που ορίζεται για ΧΥΤ μη επικίνδυνων και επικίνδυνων αποβλήτων εντούτοις αποτελούν υλικό χαμηλής υδροπερατότητας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως στρώμα στεγανοποίησης. Πιλοτικές δοκιμές που έγιναν σε περιοχή επιφανειακού μεταλλείου και σε συνολική επιφάνεια 580 m^2 απέδειξαν ότι τα κατάλοιπα βωξίτη

κατάλληλα συμπυκνωμένα λειτουργούν ως στρώμα χαμηλής υδροπερατότητας. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που ευνοεί τη χρήση των καταλοίπων βωξίτη ως στρώμα γεωλογικού φραγμού για τη στεγανοποίηση πυθμένα ΧΥΤΑ είναι το δυναμικό εξουδετέρωσης οξύτητας ($0,7 \text{ mgreq/g}$) και η δυνατότητα ρόφησης ρύπων στην επιφάνεια τους. Λόγω των ιδιοτήτων τους αυτών τα κατάλοιπα βωξίτη μπορεί να λειτουργήσουν ως ένας ακόμα παράγοντας προστασίας του εδάφους και των υπογείων υδάτων εξουδετερώνοντας τα όξινα νερά που μπορεί να διαρρεύσουν από τους ΧΥΤΑ και κατακρατώντας τους ρύπους με μηχανισμούς καταβύθισης (λόγω της μείωσης του pH) και ρόφησης στην επιφάνεια των καταλοίπων βωξίτη. Όπως επίσης προβλέπεται στο Παράρτημα Ι της Η.Π. 29407/3508 (ΦΕΚ 1572/16-12-2002) αν κριθεί απαραίτητο, πέραν της στεγανοποίησης πυθμένα μπορεί να επιβληθεί από τις αρμόδιες αρχές και η επιφανειακή στεγανοποίηση του ΧΥΤΑ. Η επιφανειακή στεγανοποίηση ορίζεται ότι πρέπει να γίνεται με αδιαπέραστα στρώματα χωρίς όμως να καθορίζεται το πάχος των στρωμάτων αυτών. Και σε αυτήν την περίπτωση όπως και στην στεγανοποίηση πυθμένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλοιπα βωξίτη κατάλληλα συμπυκνωμένα υπό την βέλτιστη υγρασία στη μέγιστη ξηρή φαινόμενη πυκνότητα ώστε να παρουσιάζουν τον ελάχιστο συντελεστή υδροπερατότητας. Τα κατάλοιπα βωξίτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως ενδιάμεση ή /και λοξή στρώση στους ΧΥΤ στερεών αστικών απορριμμάτων και να αντικαταστήσουν το χρησιμοποιούμενο φυσικό εδαφικό υλικό. Πέραν των ΧΥΤΑ, τα κατάλοιπα βωξίτη μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την αποκατάσταση των Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων (ΧΑΔΑ, ανεξέλεγκτες χωματερές). Με την χρήση καταλοίπων βωξίτη στην αποκατάσταση των ΧΑΔΑ (Χώροι Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Απορριμμάτων) επιτυγχάνονται:

- α) Η συμμόρφωση με τις βασικές αρχές της εθνικής και κοινοτικής νομοθεσίας που προτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση απορριμμάτων.
- β) Ο περιορισμός της χρήσης πρωτογενών φυσικών πόρων (αργιλικό στρώμα χαμηλής υδροπερατότητας, φυσικό έδαφος) για την αποκατάσταση των ΧΑΔΑ η διαθεσιμότητα των οποίων ενδέχεται να είναι περιορισμένη στις περιοχές όπου πρόκειται να γίνει η αποκατάσταση.

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΚΑΛΥΜΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣ ΔΕΝΔΡΟΦΥΤΕΥΣΗ ΣΕ ΧΩΡΟΥΣ ΠΡΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Το ανώτερο στρώμα σε έναν προς αποκατάσταση χώρο αποτελεί το υπόστρωμα για την ανάπτυξη βλάστησης. Τα κατάλοιπα βωξίτη μπορούν να αποτελέσουν το κύριο συστατικό αυτού του υποστρώματος. Σχετικές πιλοτικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με το Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του ΕΜ Πολυτεχνείου στα πλαίσια του έργου ΠΑΒΕΤ 2000. Στόχος τους ήταν η εκτίμηση σε πραγματικές συνθήκες της αποτελεσματικότητας της προσθήκης διαφόρων υλικών στα κατάλοιπα βωξίτη, ώστε αυτά να μπορέσουν να αποτελέσουν το κατάλληλο στρώμα για την καλλιέργεια φυτών. Η πιλοτική δοκιμή υλοποιήθηκε σε χώρο δίπλα στο εργοστάσιο της Αλουμίνιον της Ελλάδος, και καλύπτει έκταση περίπου 500 m^2 . Ως υλικά προσθήκης επελέγησαν η γύψος, που αποτελεί υποπροϊόν της βιομηχανίας παραγωγής φωσφορικών λιπασμάτων και παρουσιάζει χαμηλό pH, η ενεργός ιλύς από τις μονάδες βιολογικού καθαρισμού αστικών λυμάτων και το εμπορικό προϊόν δισόξινο φωσφορικό ασβέστιο. Σε κάθε πειραματικό τεμάχιο έχουν φυτευθεί τα ακόλουθα 3 είδη φυτών: Tamarix (αρμυρίκι), Pistacia Lentiscus (σχίνος) και κέδρος Juniperus Macrocarpa. Επίσης, κατά μήκος μιας πλευράς κάθε πειραματικού τεμαχίου (test pad) τοποθετήθηκαν σπόροι από 6 ποώδη φυτά. Μετά από 17 μήνες τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά (3).



Φωτογραφία 3 . Πιλοτική δοκιμή αξιοποίησης ΚΒ για φυτοκαλλιέργεια

ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ / ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΥΠΟΒΑΘΜΙΣΜΕΝΩΝ Η ΑΠΕΡΗΜΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ Η ΑΛΑΤΟΥΧΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Μία άλλη δυνατότητα αξιοποίησης των ΚΒ , είναι η χρήση τους ως μέσου για τον εμπλουτισμό και εν γένει τη βελτίωση υποβαθμισμένων εδαφών, δεδομένου ότι τα ΚΒ είναι πλούσια σε χρήσιμα στοιχεία. Πολλά ελληνικά εδάφη είναι φτωχά σε ορισμένα από τα στοιχεία αυτά, με αποτέλεσμα να απαιτείται η προσθήκη κατά τη διάρκεια των διαφόρων καλλιεργειών , βελτιωτικών μέσων με τα στοιχεία αυτά, κάτι που αυξάνει σημαντικά σε αρκετές περιπτώσεις το κόστος των καλλιεργειών. Η έρευνα για την χρήση των ΚΒ ως βελτιωτικού μέσου πραγματοποιείται σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Πατρών (Τμήμα Γεωλογίας- Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωχημείας) (4) και περιλαμβάνει την ανάμειξη καταλοίπων βωξίτη με ελληνικά εδάφη που παρουσιάζουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Χαμηλό pH
- Απουσία χρησίων συστατικών όπως Ca , Mg , K (υποβαθμισμένα εδάφη)
- Αλατούχα εδάφη

Επίσης, μελετώνται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες η χρήση καταλοίπων σε εδάφη ή ιζήματα πλούσια σε τοξικά ιόντα , παρεμποδίζει τη διάχυση και διασπορά τους.

ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ

Μία ακόμη δυνατότητα αξιοποίησης των καταλοίπων είναι η απόθεσή τους σε εγκαταλελειμμένα επιφανειακά μεταλλεία βωξίτη της ευρύτερης περιοχής γύρω από το εργοστάσιο. Το έργο , εκτελείται σε συνεργασία με το Εργαστήριο Μεταλλουργίας του Εθνικού Μετσόβιου

Πολυτεχνείου. Αντικείμενό του είναι η ανάπτυξη και η εφαρμογή μιας καινοτόμου, οικονομικά αποδεκτής και περιβαλλοντικά ασφαλούς μεθόδου αποκατάστασης ανοικτών επιφανειακών μεταλλευτικών εκσκαφών, με πλήρωσή τους με ξηρά κατάλοιπα βωξίτη. Στόχος του έργου είναι η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθόδου αποκατάστασης και αισθητικής αναβάθμισης του τοπίου που έχει διαταραχθεί από τις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις, με την επιστροφή των καταλοίπων βωξίτη, στους χώρους από όπου προήλθε το μέταλλευμα πριν την κατεργασία του. Το έργο πραγματοποιείται με την συγχρηματοδότηση του Ευρωπαϊκού προγράμματος LIFE ENVIRONMENT. Στα πλαίσια αυτά, πραγματοποιήθηκε πιλοτική δοκιμή με στόχο την εκτίμηση υπό πραγματικές συνθήκες της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των ΚΒ, όταν αποτίθενται σε επιφανειακές εκσκαφές. Κατά τη δοκιμή παρακολουθούνται ο όγκος και η ποιότητα των στραγγισμάτων μέσω ειδικών διατάξεων συλλογής των υδάτων αποστράγγισης (λυσίμετρα) και της επιφανειακής απορροής (5). Η πιλοτική δοκιμή καλύπτει έκταση περίπου 580 m². Από τα παραπάνω ευρήματα θα ακολουθήσει επίδειξη της δυνατότητας εφαρμογής της μεθόδου σε εγκαταλελειμμένο επιφανειακό μεταλλείο στην ευρύτερη περιοχή του εργοστασίου της «Αλουμίνιον της Ελλάδος». Η πλήρωση του μεταλλείου θα γίνει μετά από ξήρανση των καταλοίπων βωξίτη με χρήση φιλτρόπρεσσας. Η διαδικασία απόθεσης θα περιλαμβάνει τη διαδοχική ξήρανση και μεταφορά των καταλοίπων βωξίτη στο μεταλλείο και τη συμπίκνωσή τους ώστε να επιτυγχάνεται η ελάχιστη διαπερατότητα. Μετά την ολοκλήρωση της απόθεσης των καταλοίπων βωξίτη σχεδιάζεται να πραγματοποιηθεί κάλυψη τους, είτε με στείρα μεταλλείων ή τα ίδια τα κατάλοιπα βωξίτη κατάλληλα τροποποιημένα, ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν φυτοκάλυψη με φυτά που αναπτύσσονται στην ευρύτερη περιοχή της απόθεσης.



Φωτογραφία 4. Λυσίμετρο



Φωτογραφία 5. Μεταλλείο Κλεισούρας προς μελλοντική πλήρωση

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- (1) Τσώχος, Γ. & Μουρατίδης, Α.. 2004. Χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων στην οδοποιία : *Πρακτικά Επιστημονικής Ημερίδας, Εργαστήριο Οδοποιίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ* ,, Θεσσαλονίκη, 13 Μαΐου.
- (2) Τσώχος, Γ. & Μουρατίδης, Α.. 2005. Κατασκευή επιχωμάτων από φυσικά εδάφια υλικά σταθεροποιημένα με κατάλοιπα βωξίτη: *Υπόμνημα Τεχνικών Οδηγιών* , *Εργαστήριο Οδοποιίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ*.

- (3) Ξενίδης, Α. Χαροκόπου, Α.Δ., Πασπαλιάρης, Ι., Μπουφούνος, Δ. Φαφούτης, Δ., Περνιεντάκη, Η. & 2004a. Revegetation of bauxite residue: laboratory and field tests, *Proc. of 1st Int. Conf. on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG 2004)*, (Ζ. Αγιουτάντης, Κ. Κομνίτσας), Χανιά, Ιούνιος 7-9, σελ.. 487-494.
- (4) Βαρνάβας, Σ.Π., Μπουφούνος, Δ. & Φαφούτης, Δ., 2005. An investigation of the potential application of bauxite residue in soil / sediment remediation. *Proc. Of the 9th Int. Conf. On environmental science and technology*, Ρόδος, Σεπτέμβριος 1-3.
- (5) Ξενίδης, Α. Χαροκόπου, Α.Δ, Μυλωνά, Ε. Μπουφούνος, Δ. Φαφούτης, Δ., & Περνιεντάκη, Η. *Proc. of Int. Workshop in Geoenvironment and Geotechnics*, Μήλος, Σεπτέμβριος 12-14.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΛΑΦΡΟΑΔΡΑΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΥΣΗΣ ΛΙΓΝΙΤΗ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Ι.Μ. Αναγνωστόπουλος, Β.Ε. Στιβανάκης*, Δ.Κ. Παπαμαντέλλος, Γ.Ν. Αγγελόπουλος
*Εργαστήρια «Μεταλλογνωσίας» και «Υλικών και Μεταλλουργίας», Τμήμα Χημικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504 Ρίο, *vstivanakis@chemeng.upatras.gr*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Οι ενεργειακοί σταθμοί της Μεγαλόπολης παράγουν μεγάλες ποσότητες στερεών παραπροϊόντων, όπως ιπτάμενη τέφρα και τέφρα πυθμένα, τα οποία σήμερα αγγίζουν τα 4εκατ. τόνους/έτος. Η παραγωγή αυτή δημιουργεί την ανάγκη για άμεση αξιοποίησή τους σε διάφορους τομείς και εφαρμογές για περιβαλλοντικούς αλλά και οικονομικούς λόγους. Σήμερα αξιοποιείται περίπου το 7,5% της παραγωγής της ιπτάμενης τέφρας, σαν πρόσθετο στη παραγωγή τσιμέντου Portland Ελληνικού τύπου. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποκλείει της απορρόφηση της τέφρας πυθμένα εξ' αιτίας του υψηλού ποσοστού άνθρακα που περιέχει (~10%κβ). Η κατεύθυνση αξιοποίησης που διερευνάται, αφορά στην παραγωγή ελαφροαδρανών υλικών. Η διεργασία που μελετάται συνίσταται σε πρώτο στάδιο στην πελλετοποίηση των κόνεων και στην συνέχεια στην πυροσυσσωμάτωση τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, τα τελικά προϊόντα εμφανίζουν καλές φυσικές ιδιότητες και υψηλές αντοχές για την πιθανή χρήση τους ως δομικά και θερμομονωτικά υλικά.

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, τέφρα πυθμένα, πυροσυσσωμάτωση, ελαφρόπετρα

LIGHTWEIGHT AGGREGATES PRODUCTION FROM MEGALOPOLIS LIGNITE COMBUSTION BY-PRODUCTS

I.M. Anagnostopoulos, V.E. Stivanakis*, D.K. Papamantellos, G.N. Angelopoulos
*Laboratory of "Materials and Metallurgy", Dept. of Chemical Engineering, University of Patras,
26504, Rio, *vstivanakis@chemeng.upatras.gr*

ABSTRACT: The power plant of Megalopolis (Peloponnesus, Greece) has two main solid byproducts (fly ash and bottom ash) with total production 4 Mt/year. Thus, their utilization (mainly in construction industries) is necessary. Today only 7.5% of the total Megalopolis fly ash is used as additive in cement industry to produce Greek type Portland cement. The use of bottom ash in this process is impossible because of its high carbon content (10%). In this research, production of lightweight aggregates using mixtures of bottom and fly ash is investigated. As a result, substitution of significant amount of natural lightweight aggregates is possible with economical and environmental advantages. The experimental work includes pelletizing of mixtures of bottom and fly ash, and sintering of the pellets in high temperature. The final products of this process have technological properties similar to these of natural lightweight aggregates (porosity, bulk density, thermal conductivity).

Keywords: fly ash, bottom ash, sintering, lightweight aggregate

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην χώρα μας η συνολική παραγωγή (800.000 τόνους/έτος) φυσικών ελαφροαδρανών από την Νήσο Γυαλί (Δωδεκάνησα) θεωρείται προσωρινά επαρκής για τις εγχώριες ανάγκες και επιτρέπει μικρές εξαγωγές. Παρόλα αυτά η εξόρυξή τους παρουσιάζει προβλήματα εξαιτίας των αρχαιολογικών ευρημάτων που εντοπίζονται στο νησί αλλά και της καταστροφής που προκαλεί η εξόρυξή της στη φυσική ομορφιά του νησιού.

Σήμερα τα ελαφροαδρανή υλικά βρίσκουν όλοένα και περισσότερες εφαρμογές είτε ως δομικό και θερμομονωτικό υλικό είτε ως υπόστρωμα κήπων, γεγονός που δημιουργεί συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις.

Η παραγωγή τεχνητών ελαφροαδρανών μπορεί να συνεισφέρει στην επίλυση του προβλήματος. Η Ιπτάμενη Τέφρα (ΙΤ) και η Τέφρα Πυθμένα (ΤΠ) που είναι παραπροϊόντα των λιγνιτικών σταθμών της Μεγαλόπολης (Πελοπόννησος) και τα οποία παράγονται σε μεγάλες ποσότητες μπορούν να αποτελέσουν την α' ύλη για αυτή την διεργασία. Επιπλέον η αξιοποίησή τους είναι επιτακτική για περιβαλλοντικούς αλλά και οικονομικούς λόγους. Η παραγόμενη ποσότητα των παραπροϊόντων αυτών αγγίζει τα 4 εκ. τόνους ετησίως και μόνο το 7.5% της παραγόμενης ΙΤ χρησιμοποιείται για την παραγωγή τσιμέντου Portland Ελληνικού Τύπου, ενώ καμία ποσότητα ΤΠ δεν χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες δομικών υλικών εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα.

Η παρούσα μελέτη βασίζεται στην πυροσυσσωμάτωση (sintering) μιγμάτων αυτών των υλικών κατά την οποία ο περιεχόμενος άνθρακας της ΤΠ θα αποτελέσει το απαιτούμενο καύσιμο για την ολοκλήρωση της διεργασίας με σκοπό την παραγωγή πορώδους αδρανούς υλικού. Η ΙΤ θα χρησιμοποιηθεί στην διεργασία με στόχο να υπάρξει συνολική απορρόφηση των στερεών παραπροϊόντων της λιγνιτικής καύσης.

Οι κύριες μεταβλητές που ρυθμίζουν τις διεργασίες πυροσυσσωμάτωσης είναι:

- Η χημική και ορυκτολογική σύσταση των α' υλών
- Η υγρασία και το στερεό καύσιμο που συμπεριλαμβάνεται στις α' ύλες
- Η διαπερατότητα και το ύψος της σχηματιζόμενης κλίνης, και
- Η ταχύτητα του αέρα

Στα πειράματά μας η διεργασία εφαρμόστηκε για την παραγωγή ελαφροαδρανών υλικών από μίγματα ΙΤ, ΤΠ και μικρής ποσότητας μεταλλουργικού ασβέστη.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Οκτώ μίγματα διαφορετικής αναλογίας ΙΤ/ΤΠ πυροσυσσωματώθηκαν και τα προϊόντα τους χρησιμοποιήθηκαν στην παραγωγή σκυροδέματος με τσιμέντα Portland. Στα δοκίμια του σκυροδέματος μετρήθηκε η θερμική τους αγωγιμότητα σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες προκειμένου να καταγραφεί η θερμική τους συμπεριφορά και να γίνει σύγκριση με τα φυσικά ελαφροαδρανή.

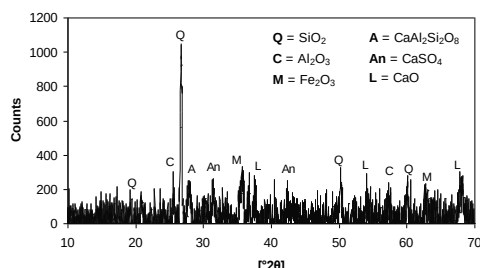
Στα μίγματα αυτά ελήφθη υπό όψη ότι η περιεκτικότητα της ΤΠ σε στερεό άνθρακα αγγίζει το 10% (κ.β επί ξηρού) ενώ της ΙΤ είναι 1,31%. Η υγρασία και οι πτητικές ενώσεις της ΤΠ ισοδυναμούν περίπου με το 40% του βάρους της ενώ η ΙΤ βρίσκεται σε σχεδόν ξηρή κατάσταση (3% υγρασία).

Η αναλυτική σύσταση των υλικών αυτών φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 1.

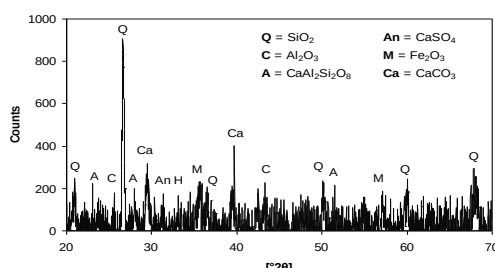
Πίνακας 1. Χημική σύσταση ξηρής ΙΤ και ΤΠ (κβ %)

ΕΝΩΣΗ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	C	Σύνολο
ΙΤ	49.4	22.65	7.42	8.85	1.62	0.85	1.39	2.55	1.31	96.04
ΤΠ	44.6	19.93	6.28	7.51	1.43	0.75	1.22	2.24	10.1	94.1

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις της ΙΤ και ΤΠ εμφανίζουν τις εξής φάσεις: quartz, anhydrite, plagioclase, hematite, mulite and gehlenite (Michailidis 1996, Stivanakis 2003), όπως φαίνονται στις Εικόνες 1 και 2.

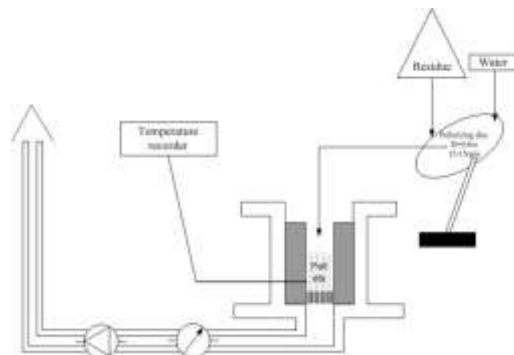


Εικόνα 1. Ορυκτολογική ανάλυση ΙΤ



Εικόνα 2. Ορυκτολογική ανάλυση ΤΠ

Οι δοκιμές πυροσυσσώματωσης πραγματοποιήθηκαν σε συσκευή που αποτελείται από κάδο εσχάρας επιφάνειας 0,04m² και δίσκο σφαιροποίησης διαμέτρου 0.4m. Η συσκευή αυτή είναι εγκατεστημένη στο εργοστάσιο του TITAN στο Δρέπανο και φαίνεται διαγραμματικά στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3. Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής εγκατάστασης σφαιροποίησης & πυροσυσσώματωσης

Στην διεργασία οι α' ύλες (μίγματα) αναμίχθηκαν και σφαιροποιήθηκαν (πελλετοποίηση) στον υπό κλίση περιστρεφόμενο δίσκο σε πελλέτες διαμέτρου 4-10mm. Έπειτα τοποθετήθηκαν στον κάδο πυροσυσσώματωσης σχηματίζοντας μια διαπερατή, από τον αέρα, κλίνη. Στον πυθμένα του κάδου είναι εγκατεστημένη σχάρα που επιτρέπει την διέλευση του αέρα και η οποία συνδέεται με μυζητήρα. Ο μυζητήρας ρουφάει τον αέρα από τον πυθμένα του κάδου δημιουργώντας συνθήκες υποπίεσης στην κλίνη. Η δημιουργούμενη υποπίεση μετατοπίζει τη ζώνη καύσης από την κορυφή στον πυθμένα του κάδου (κλίνης). Η πυροσυσσώματωση διαρκεί περίπου 10-15min και αναπτύσσονται θερμοκρασίες 1100-1250°C.

Τα μίγματα προετοιμάστηκαν με διαφορετικές αναλογίες ΤΠ και ΙΤ και σταθερό ποσοστό ασβέστη, με σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη αναλογία τους σχετικά με τις αποκτώμενες φυσικές και θερμικές ιδιότητες των πυροσυσσωμάτων. Στον Πίνακα 2 φαίνονται αναλυτικά οι αναλογίες των μιγμάτων που πυροσυσσωματώθηκαν.

Πίνακας 2. Αναλογίες (% κ.β.) μιγμάτων πυροσυσσωμάτωσης

Μίγμα	Σ11	Σ12	Σ13	Σ14	Σ15	Σ16	Σ17	Σ18
ΤΠ	35	55	65	70	75	80	85	90
ΙΤ	62	42	32	27	22	17	12	7
Ασβέστης	3	3	3	3	3	3	3	3

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΠΥΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Χημικές και ορυκτολογικές αναλύσεις

Τα προϊόντα της πυροσυσσωμάτωσης χαρακτηρίστηκαν από χημική και ορυκτολογική άποψη. Οι χημικές αναλύσεις των προϊόντων πραγματοποιήθηκαν βάση της μεθόδου ατομικής απορρόφησης. Η χημική τους σύσταση φαίνεται στον Πίνακα 3.

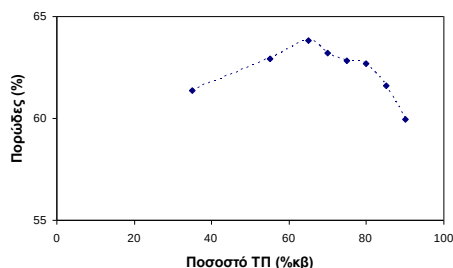
Πίνακας 3. Χημική σύσταση μιγμάτων (επί ξηρού κ.β.%)

Μίγμα	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	Σύνολο
Σ11	49.81	23.86	7.19	10.92	2.02	1.57	1.61	0.37	96.98
Σ12	51.28	24.18	7.01	13.04	1.75	1.36	0.78	0.6	100
Σ13	49.27	25.55	7.8	12.68	1.95	1.46	0.98	0.0	99.7
Σ14	50.1	26	6.3	13	2	1.8	0.8	0.0	100
Σ15	49.61	24.94	6.69	10.68	2.01	1.67	1.75	0.42	97.35
Σ16	51.45	23.2	8.41	12.68	1.81	1.36	0.45	0.32	99.7
Σ17	48.17	26.01	8.13	9.54	2.23	2	0.58	1.71	98.3
Σ18	49.77	23.06	6.63	10.85	1.97	1.73	1.51	0.87	97.52

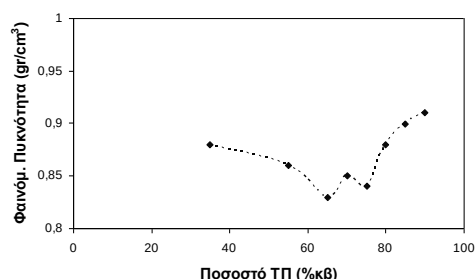
Οι ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της διάθλασης ακτίνων-Χ. Οι σημαντικότερες φάσεις που προκύπτουν για τα προϊόντα πυροσυσσωμάτωσης είναι οι εξής: Anorthite, Quartz, Cristobalite, Hematite, Maghemite και Calcium Aluminate.

Μετρήσεις τεχνολογικών ιδιοτήτων

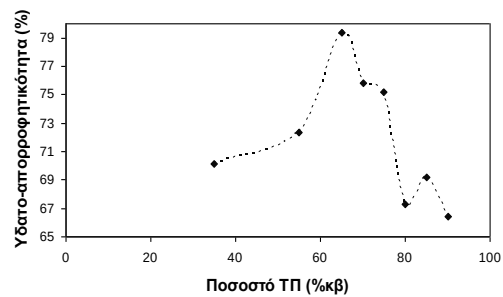
Στα προϊόντα της πυροσυσσωμάτωσης μετρήθηκαν φυσικές ιδιότητες όπως το πορώδες, η φαινόμενη πυκνότητα και η υδατοαπορροφητικότητα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων φαίνονται στις παρακάτω Εικόνες.



Εικόνα 4. Πορώδες (%) προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης



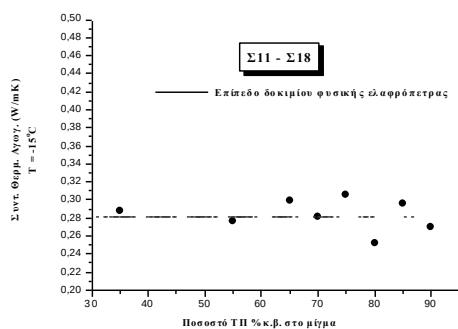
Εικόνα 5. Φαιν. πυκνότητα (gr/cm³) προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης



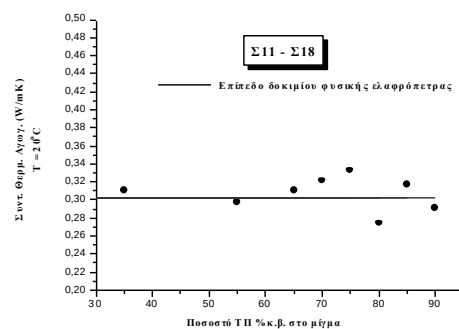
Εικόνα 6. Υδατοαπορροφητικότητα προϊόντων πυροσυσσωμάτωσης

Από τις Εικόνες 4, 5 και 6 προκύπτει ότι το πορώδες και η υδατοαπορροφητικότητα των προϊόντων κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα (59-63% & 65-75% αντίστοιχα) ενώ η πυκνότητά τους δεν ξεπέρασε τα $0,91 \text{ gr/cm}^3$. Η βέλτιστη αναλογία μιγμάτων (μέγιστες τιμές για τις δύο πρώτες ιδιότητες και η ελάχιστη για την τρίτη ιδιότητα) εμφανίζεται στην περιοχή γύρω από το 70% ΤΠ.

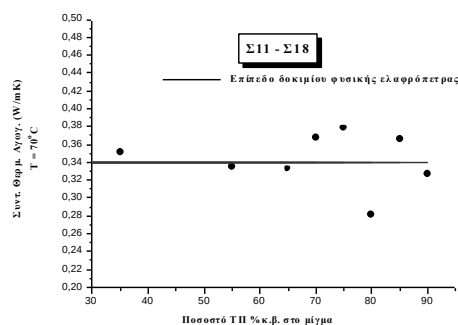
Οι μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια σκυροδέματος με τα παραγόμενα ελαφροαδρανή στις θερμοκρασίες -15 , 20 & 70°C . Τα δοκίμια σκυροδέματος τα οποία κατασκευάστηκαν έχουν διαστάσεις: $20 \times 20 \times 5 \text{ cm}$ και οι μετρήσεις του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν βάσει της μεθόδου θερμής πλάκας σε συσκευή FOX 200. Τα αποτελέσματα που φαίνονται στις Εικόνες 7, 8 & 9 αξιολογούνται ως ενθαρρυντικά.



Εικόνα 7. Συντελεστής θερμ. αγωγιμ. δοκιμίων με προϊόντα Σ11-Σ18 στους -15°C



Εικόνα 8. Συντελεστής θερμ. αγωγιμ. δοκιμίων με προϊόντα Σ11-Σ18 στους 20°C



Εικόνα 9. Συντελεστής θερμ. αγωγιμ. δοκιμίων με προϊόντα Σ11-Σ18 στους 70°C

Συγκεκριμένα φαίνεται ότι οι μέσες τιμές θερμικής αγωγιμότητας των δοκιμών με προϊόντα Σ11-Σ18 στα παραπάνω διαγράμματα κινούνται στο επίπεδο της τιμής που εμφανίζει το δοκίμιο φυσικής ελαφρόπετρας. Ιδιαίτερα, τα πρώτα τρία δοκίμια Σ11-Σ13 εμφανίζουν σχεδόν ίδια αγωγιμότητα με την φυσική ελαφρόπετρα ενώ στα υπόλοιπα δείγματα εμφανίζεται μεγαλύτερη απόκλιση. Η απόκλιση αυτή οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι τα δοκίμια με Σ14-Σ18 περιέχουν υψηλότερα ποσοστά άνθρακα (υψηλά ποσοστά ΤΠ) του οποίου η καύση οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση ισχυρότερων αντιδράσεων με εντονότερες διακυμάνσεις στις ιδιότητες. Γενικά παρατηρούμε ότι οι τιμές ευρίσκονται στην περιοχή της φυσικής ελαφρόπετρας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα αυτής έρευνας είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά και δείχνουν ότι η ΤΠ είναι εφικτό να αξιοποιηθεί μέσω της πυροσυσσωμάτωσης ως ελαφροβαρές και θερμομονωτικό υλικό. Επιπλέον, φαίνεται ότι μπορεί να βρεθεί λύση στα περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την εναπόθεση των παραπροϊόντων της Μεγαλόπολης όπως επίσης και την εξόρυξη ελαφρόπετρας από την νήσο Γυαλί.

Για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης έρευνας πρέπει να πραγματοποιηθούν πιλοτικές δοκιμές παραγωγής ελαφροαδρανών από μίγματα ΙΤ και ΤΠ προκειμένου να μελετηθεί η παραγωγή των υλικών σε ημιβιομηχανική κλίμακα. Επίσης, θεωρείται απαραίτητο να μετρηθούν οι αντοχές σκυροδέματος με τα παραγόμενα ελαφροαδρανή ώστε να αποκτήσουμε μια πλήρη εικόνα των τεχνολογικών ιδιοτήτων των παραγόμενων προϊόντων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Alexopoulou, I.E., Aggelopoulos G.N., Papamantellos D.K. and Rentizelas G. (1994). The dust recycling problem of the FeNi production at Larymna, Greece. Part I: Operational and experimental results, *Erzmetal* 47, Nr.9, p. 562-571. Cappel F. und Wendeborn f. (1973). *Sintern von Eisenerzen*, Verlag Stahleisen. M.B.H. Dusseldorf.
2. Dawson, R.P., (1993), *Ironmaking and Steelmaking*, Vol. 20, Nr.2, 137-143.
3. Lampropoulou, P.G., Alexopoulou, I.E. and Aggelopoulos G.N. (2003). Agglomeration of dust and sludge of the FeNi production. *Erzmetall*, Vol. 9, p. 551-557. Karamoutsos, S., Alexopoulou, I.E., Stivanakis, V., Fotias, P. and Papamantellos D.C. (2003). Investigation of the Safe Disposal of Sintered Oil Fired Power Station Solid Residues. *Environmental science and technology*, Lemnos island, September 8-10.
4. Michailidis, K., Sakorafa, V. and Burragato, F., (1996). Mineralogy, geochemistry and properties of fly ash from the Megalopolis lignite fields, Peloponnese, Southern Greece. *Fuel*, Vol.75, No 4: 419-423.
5. Stivanakis, V., Papamantellos, D.K. and Galanoulis, E. (2003). "Evaluation of Greek type Portland cement based on Megalopolis fly ash addition, *Steel Grips* 2, (2003).
6. Tupkary, R.H. (2nd ed.) (1985). *Introduction to Modern Iron Making*. Delhi: Khana Publishers, Delhi.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ ΣΤΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΑ / ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ, ΛΑΣΠΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΖΑΡΟΣΙΤΗ / ΑΛΟΥΝΙΤΗ

Μ. Κατσιώτη, Α. Χειλάς, Α. Γεωργιάδης

Σχολή Χημικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Χ. Τέας, Ε. Χανιωτάκης

Α.Ε. Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, Εργοστάσιο Καμαρίου, 19200 Ελευσίνα, τηλ. 210-5537739

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ο βασικός στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση εναλλακτικής χρήσης για τελική απόρριψη λάσπης, από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων με τη χρήση μίγματος λάσπης – τσιμέντου και ιζήματος ζαροσίτη / αλουνίτη (Z/A). Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια σκλήρυνσης των παραγώγων με δύο τεχνικές: 1) σε κανονικές και 2) σε επιταχυνόμενες συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν δοκίμια διαστάσεως 4x4x16cm με περιεκτικότητα 50% λάσπης 30% τσιμέντου και 20% Z/A. Τα δοκίμια μετά από 7 ημέρες από την παρασκευή τους τοποθετήθηκαν σε αυτόκλειστο ενώ επίσης παρέμειναν σε εργαστηριακές συνθήκες για 28 και 90 ημέρες. Ο έλεγχος της πορείας ενυδάτωσης έγινε με χημικές αναλύσεις, ορυκτολογικές, θερμικής ανάλυσης και δοκιμές αντοχής σε θλίψη και κάμψη. Επιπλέον έγιναν δοκιμές εκχύλισης βαρέων μετάλλων με την πρότυπη μέθοδο TCLP και την prEN14405. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούν να παραχθούν σταθεροποιημένα / στερεοποιημένα παράγωγα για δομική χρήση.

Λέξεις κλειδιά: λάσπη, τσιμέντο, ζαροσίτης/αλουνίτης, σταθεροποίηση/στερεοποίηση

IMPACT OF HARDENING CONDITIONS ON STABILIZED / SOLIDIFIED PRODUCTS OF CEMENT, MUNICIPAL WASTE SLUDGE AND JAROSITE / ALOUNITE

M. Katsioti, A. Cheilas, A. Georgiadis

School of Chemical Engineering, NTUA

C. Teas, E. Chaniotakis

TITAN Cement Company SA, Kamari Plant, 19200 Elefsis, tel. 210-5537739

ABSTRACT: The aim of the present paper is to evaluate the performance of an alternative use for the final utilization of the municipal waste sludge. The sludge is combined with cement and jarosite/alounite (J/A) precipitate for the development of construction materials. Two different methods were used for the hardening of stabilized/solidified products: laboratory conditions and autoclave conditions. For this purpose, 4X4X16 prisms were prepared. After 7 days curing, specimens were autoclave treated and also remained in laboratory conditions for 28 and 90 days. Evaluation of hydration was made with chemical, mineral and thermal analyses. Specimens were tested also for compressive and flexural strength. Leaching test according to TCLP and prEN14405 were also performed. Results showed that the production of stabilized/solidified products for construction with the use of the J/A precipitate is possible.

Keywords: municipal waste sludge, cement, jarosite/alounite, stabilization/soilidification

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Σταθεροποίηση/Στερεοποίηση (Σ/Σ) είναι η διεργασία επεξεργασίας επικίνδυνων αποβλήτων, πριν την απόρριψή τους σε χώρους υγειονομικής ταφής. Ο κύριος λόγος που κάνει τη Σ/Σ τόσο ευρέως διαδεδομένη είναι το γεγονός ότι ακινητοποιεί και εγκλωβίζει επικίνδυνες ουσίες όπως είναι τα βαρέα μέταλλα, που περιέχονται στα απόβλητα. Ο βασικός στόχος αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση μιας εναλλακτικής χρήσης για τελική απόρριψη λάσπης από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, με την χρήση μίγματος λάσπης – τσιμέντου – ζαροσίτη/αλουνίτη (Ζ/Α) για την δημιουργία νέων κατασκευαστικών υλικών. Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια εφαρμογής σκλήρυνσης των Σ/Σ παραγώγων με δύο τεχνικές: 1) σε κανονικές και 2) σε επιταχυνόμενες συνθήκες. Η επεξεργασία του Ζ/Α με λάσπη στο αυτόκλειστο αποδίδει ένα προϊόν που περιέχει μέταλλα πιο σταθερά από αυτά στον αρχικό Ζ/Α. Τα περισσότερα από τα μέταλλα μετασχηματίζονται σε οξείδια η ακόμα σε σουλφίδια τα οποία δεν εκχειλίζονται από το προσομοιωμένο βρόχινο νερό.

Ο Ζ/Α παράγεται ως προϊόν μιας ολοκληρωμένης μεθόδου υδρομεταλλουργικής κατεργασίας ελληνικών νικελιούχων λατεριτών η οποία έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Μεταλλουργίας του Ε.Μ.Π. και συνίσταται στην εκχύλιση σε σωρούς (heap leaching), με θειικό οξύ, λατεριτών με χαμηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο (<1%) σε ατμοσφαιρικές συνθήκες και στην κατεργασία του προκύπτοντος μεταλλοφόρου διαλύματος. Η λάσπη αναμιγνύεται σε διάφορες αναλογίες με το Ζ/Α το τσιμέντο και την άμμο. Οι παράμετροι κλειδιά της έρευνας αυτής είναι η εκχυλιστικότητα των βαρέων μετάλλων από τα επεξεργασμένα απόβλητα και η αντοχή σε θλίψη των επεξεργασμένων δειγμάτων λάσπης. Τα κριτήρια για την επίτευξη του στόχου είναι τα ακόλουθα:

- Η αντοχή σε θλίψη των σταθεροποιημένων/στερεοποιημένων παραγώγων να υπερβαίνει την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή των 350 kPa στις 28 ημέρες.
- Το pH του εκχυλίσματος των παραγώγων να κυμαίνεται στην περιοχή χαμηλής διαλυτότητας των οξειδίων των μετάλλων (pH=7-9).
- Η συγκέντρωση των βαρέων μετάλλων των παραγώγων να μην υπερβαίνει τα όρια της επικινδυνότητας για την ασφαλή απόρριψη αυτών στο περιβάλλον.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Υλικά και μέθοδοι

Η λάσπη που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία προέρχεται από το Κέντρο Επεξεργασίας Λυμάτων και Βοθρολυμάτων της Μεταμόρφωσης. Αυτή αφού ξηράνθηκε, μέχρι σταθερού βάρους, στους 105 °C ακολούθως λειοτριβήθηκε. Το περιεχόμενο της υγρασίας και το pH μετρήθηκαν σύμφωνα με τις πρότυπες μεθόδους. Ο Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC) καθορίστηκε με τη μέθοδο τιτλοδότησης και η συγκέντρωση σε βαρέα μέταλλα μετρήθηκε μέσω Φασματοφωτομέτρου Ατομικής Απορρόφησης Perkin Elmer 3300. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 1. Στο δείγμα ζαροσίτη/αλουνίτη πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση του ιζήματος και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, ενώ στο Σχήμα 1 δίδονται τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής ανάλυσης του ιζήματος. Ακολούθως έγινε κοκκομετρική ανάλυση για τη λάσπη και το ίζημα του Ζ/Α.

Στο Σχήμα 2 δίδονται τα αποτελέσματα της μέτρησης του % διερχόμενου ποσού για κάθε υλικό. Από το Σχήμα 2 φαίνεται ότι το 100% του διερχομένου ποσού για το Ζ/Α είναι 32 μm ενώ για τη λάσπη αντιστοιχεί ποσοστό 64.7%.

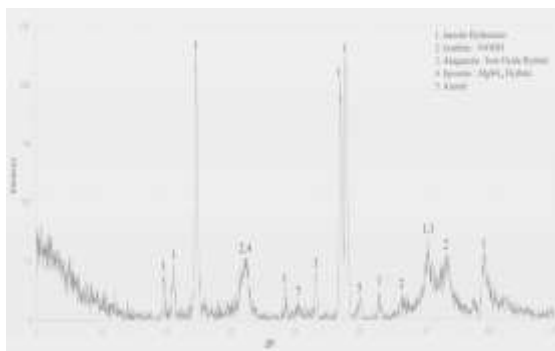
Πίνακας 1. Χαρακτηρισμός δείγματος λάσπης

Παράμετροι	Ιλός Μεταμόρφωσης
Υγρασία (%)	78
TOC (%)	10
PH	7.00
Βαρέα Μέταλλα (mg/g)*	
Cr	0.470
Cu	0.460
Fe	13.160
Ni	0.230
Pb	1.090
Zn	2.400

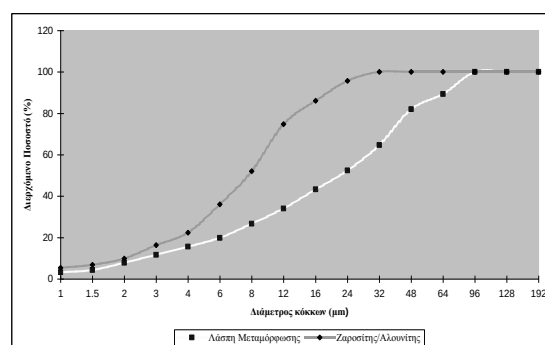
*Συγκέντρωση βαρέων μετάλλων σε mg ανά g δείγματος ξηρής λάσπης

Πίνακας 2. Χημική ανάλυση ιζήματος ζαροσίτη/αλουνίτη

ΟΞΕΙΔΙΑ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	LOI	SO ₃	Cr ₂ O ₃	CoO	Σύνολο
(%)	1.20	18.55	39.66	0.46	0.04	20.00	17.34	1.36	0.05	98.66



Σχήμα 1. Ανάλυση XRD του ιζήματος Ζ/Α.



Σχήμα 2. Κοκκομετρική διαβάθμιση Ζ/Α και λάσπης Μεταμόρφωσης

Προετοιμασία των δειγμάτων

Για την προετοιμασία των αναφερόμενων δοκιμών χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II 32.5 N/mm², με αντοχές 28 ημ 40MPa. Επίσης χρησιμοποιήθηκε πρότυπη άμμος σύμφωνα με το EN 196-1. Κάθε παρτίδα τριών δοκιμών αποτελείται από μίγμα τσιμέντου – λάσπης – Ζ/Α, άμμου και νερού. Η διαδικασία ανάμειξης ήταν ίδια για όλα τα δείγματα. Τα δοκίμια ελέγχθηκαν για τον καθορισμό της αντοχής σε θλίψη σύμφωνα με τις μεθόδους που περιγράφονται στο EN 196-1. Η αναλογία στερεών λάσπης/συνδετικού που εφαρμόστηκε ήταν 0.22/1. Η σύσταση του κονιάματος τσιμέντου-Ζ/Α-λάσπης στα δείγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Το αυτόκλειστο αποτελείται από ένα δοχείο υψηλής πίεσης ατμού εφοδιασμένο και με θερμόμετρο. Επίσης είναι εξοπλισμένο με ρυθμιστή αυτόματης πίεσης και μία βαλβίδα ασφαλείας. Δύο από τα δοκίμια μας επεξεργάστηκαν σε αυτόκλειστο με σκοπό την ταχύτερη ανάπτυξη αντοχών του υλικού. Τα δείγματα αυτά ήταν α) με συνδετικό υλικό τσιμέντο και β) με συνδετικό υλικό τσιμέντο και ζαροσίτη. Τα δοκίμια παρέμειναν στο αυτόκλειστο για 3 ώρες σε θερμοκρασία T = 200 °C και πίεση P = 16 atm.

Πίνακας 3: Σύσταση Κονιαμάτων Και Αναλογίες Συστατικών

Δείγματα	Λάσπη/ Συνδετικό	Στερεά λάσπης/ Συνδετικό	Στερεά λάσπης/ Τσιμέντο	Ξηρή λάσπη (g)	Τσιμέντο (g)	Ζαροσίτης (g)	Άμμος (g)	Νερό (ml)
MYT	1/1	0.22/1	0.22/1	49.5	225	0	1350	180
MYTZ	1/1	0.22/1	0.36/1	49.5	135	90	1350	185
MYTA	1/1	0.22/1	0.22/1	49.5	225	0	1350	170
MYTZA	1/1	0.22/1	0.36/1	49.5	135	90	1350	180

Μ:Μεταμόρφωση, Τ:Τσιμέντο, Ζ:Ζαροσίτης/Αλουμίτης, Υ:Υγρή Α:Αυτόκλειστο

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μετρήσεις Αντοχών

Τα αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε θλίψη και σε κάμψη όλων των δειγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Τα συμπεράσματα είναι ότι, όλα τα μίγματα ξεπέρασαν το όριο αντοχής σε θλίψη των 350 kPa στις 28 ημέρες και η υποκατάσταση μέρους του τσιμέντου από Ζ/Α μείωσε τις τιμές των αντοχών. Το γεγονός αυτό αντισταθμίζεται με το οικονομικό όφελος που προκύπτει λόγω της χρήσης μικρότερης ποσότητας τσιμέντου.

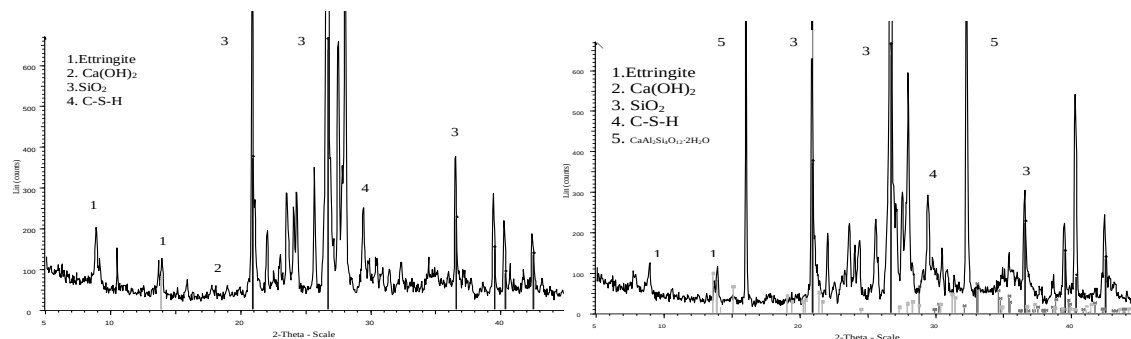
Πίνακας 4. Αποτελέσματα μετρήσεων αντοχής σε θλίψη (kPa)

Δείγματα	Αντοχή σε κάμψη kPa (28 ημέρες)	Αντοχή σε θλίψη kPa (28 ημέρες)	Αντοχή σε κάμψη kPa (3 μήνες)	Αντοχή σε θλίψη kPa (3 μήνες)	Αυτόκλειστο	
					Αντοχή σε κάμψη kPa (7 ημέρες)	Αντοχή σε θλίψη kPa (7 ημέρες)
MYZTA	-	-	-	-	675	2125
MYTA	-	-	-	-	1525	5140
MYZT	1120	2640	1846	4365	-	-
MYT	1450	4815	2200	6500	-	-

M:Μεταμόρφωση, T:Τσιμέντο, Z:Ζαροσίτης/Αλουνίτης, A:Αυτόκλειστο, Y:Υγρή

Αποτελέσματα με ορυκτολογική ανάλυση (XRD)

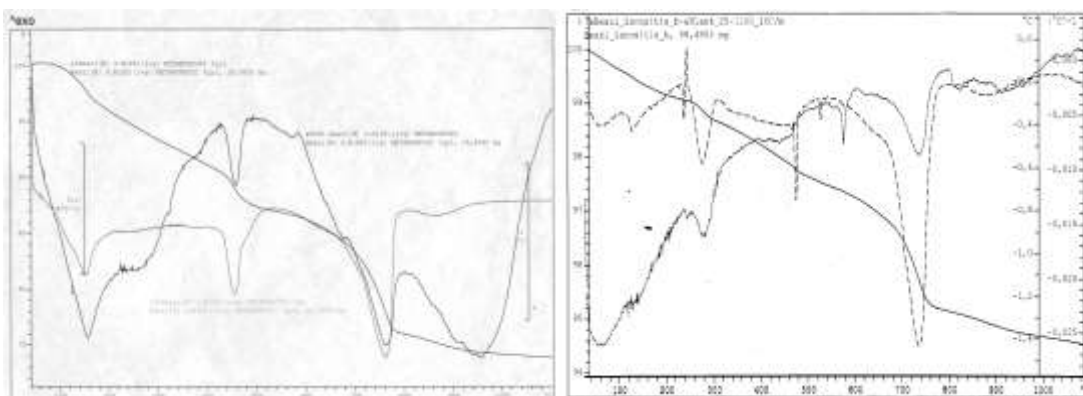
Οι αναλύσεις με XRD δίδονται έδειξαν ότι και τα τέσσερα κονιάματα περιείχαν ετρινγκίτη. Η παρουσία του Z/A ενισχύει τον σχηματισμό του ετρινγκίτη λόγω των επιπλέον θειικών του Z/A. Ο ετρινγκίτης είναι το κύριο προϊόν ενυδάτωσης όταν χρησιμοποιείται το ίζημα Z/A και δίδει τις υψηλές αντοχές σε θλίψη. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα διαγράμματα XRD για τα δείγματα MYZT και MYZTA.



Σχήμα 3. XRD Ανάλυση του κονιάματος MYZT και MYZTA

Μελέτη με θερμικές μεθόδους ανάλυσης

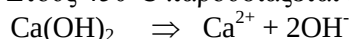
Χρησιμοποιήθηκε το TGA/SDTA 851 της METTLER TOLEDO του Εργαστηρίου Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Τα διαγράμματα εμφανίζονται στο Σχήμα 4 όπου δίνονται οι καμπύλες που αναφέρονται στην θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA), στην διαφορική θερμοβαρυμετρική ανάλυση (DTG) και στην ταυτόχρονη διαφορική θερμική ανάλυση (SDTA) των δειγμάτων MYZT και MYZTA.



Σχήμα 4. Καμπύλες TG-DTG-SDTA για το κονίαμα MYZT και MYZTA

Από τη μελέτη των παραπάνω διαγραμμάτων φαίνεται ότι υπάρχουν χαρακτηριστικές κορυφές που αντιστοιχούν σε τρία διαφορετικά είδη αντιδράσεων:

- Η πρώτη κορυφή είναι ενδόθερμης αντίδρασης οφείλεται στην απώλεια του απορροφούμενου νερού και παρουσιάζεται μετά τους 100°C.
- Στους 300°C προκύπτουν κορυφές από τα διάφορα στάδια αφυδάτωσης των ενυδατωμένων προϊόντων C-S-H και C-A-H
- Στους 450°C παρουσιάζεται η κορυφή που οφείλεται στην ενδόθερμη αντίδραση:



με την οποία υποδηλώνεται η παρουσία του Ca(OH)_2 . Η κορυφή δεν παρατηρείται στο κονίαμα που περιέχει Ζ/Α παρά μόνο στο κονίαμα που έχει τσιμέντο, λόγω του ότι παρουσία Ζ/Α είναι ευκολότερος ο σχηματισμός του ετρινγκίτη.

- Στους 750°C έχουμε την ενδόθερμη αντίδραση διάσπασης του CaCO_3 :



εξαιτίας του ασβεστόλιθου του τσιμέντου, όπου παρατηρείται επίσης και μεταβολή βάρους.

Δοκιμές εκχύλισης

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του ελέγχου εκχύλισης TCLP και της πρότυπης δοκιμής εκχύλισης prEN 14405, στα παράγωγα της τεχνικής Σ/Σ παρουσιάζονται στους Πίνακες 6α και 6β. Οι έλεγχοι αυτοί εφαρμόστηκαν σε όλα τα δείγματα, αφού αυτά πέρασαν το όριο των 350 kPa στον έλεγχο σε αντοχή σε θλίψη.

- Η δοκιμή εκχύλισης TCLP και η πρότυπη μέθοδος prEN 14405 έδειξαν υψηλά ποσοστά συγκράτησης των βαρέων μετάλλων στις φάσεις του τσιμέντου. Η συγκράτηση αυτή των μορίων των βαρέων μετάλλων στην πάστα του ενυδατωμένου τσιμέντου Πόρτλαντ είναι συνδυασμός περισσότερων της μίας χημικών διεργασιών. Οι πιθανοί μηχανισμοί περιλαμβάνουν ιοντική προσρόφηση στο C-S-H προϊόν ενυδάτωσης, ιοντική ενσωμάτωση στο κρυσταλλικό πλέγμα ορισμένων σωματιδίων του ενυδατωμένου τσιμέντου, όπως του ετρινγκίτη, και τέλος φυσική ρόφηση στους πόρους.
- Η χρήση ιζήματος ζαροσίτη/αλουνίτη δεν είχε καμία επίδραση στη συγκράτηση των βαρέων μετάλλων. Γίνεται φανερό ότι αυτά συγκρατώνται από το τσιμέντο.

- Τέλος από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι και στα τέσσερα δείγματα είχαμε περίπου την ίδια συγκράτηση των βαρέων μετάλλων. Άρα η επεξεργασία στο αυτόκλειστο έχει την ίδια επίδραση με τις εργαστηριακές συνθήκες, που εξετάστηκαν, στη συγκράτηση των βαρέων μετάλλων.

Πίνακας 6α. Αποτελέσματα από την εφαρμογή ελέγχου TCLP σε δείγματα με λάσπη.

	Cu		Fe		Zn		Ni		Cr		Pb		pH
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
M	2.43	0	9.40	0	4.20	0	2.22	0	0.73	0	0.30	0	
MYT	0.214	91.2	0.328	96.5	0.015	99.6	0.072	96.7	0.030	95.9	0	100	6.74
MYZT	0.134	94.4	5.298	43.6	0.430	89.8	1.955	11.9	0.142	80.5	0.29	3.33	6.67
MYTA	0.212	91.3	0.548	94.2	0.022	99.5	0	100	0.005	99.3	0	100	6.75
MYZTA	0.590	75.7	1.088	88.4	0.209	95.0	1.841	17.1	0.289	60.4	0	100	6.95

Πίνακας 6β. Αποτελέσματα από την εκχύλιση κατά EN 14405 σε δείγματα με λάσπη.

	Cu		Fe		Zn		Ni		Cr		Pb		pH
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	
M	2.43	0	9.40	0	4.20	0	2.22	0	0.73	0	0.30	0	
MYT	0.179	92.6	0.035	99.6	0	100	0.135	93.9	0.087	88.1	0.22	26.7	6.71
MYZT	0.148	93.9	0.043	99.5	0	100	1.649	25.7	0.109	85.1	0	100	6.75
MYTA	0.185	92.4	0.043	99.5	0	100	0	100	0.009	98.8	0	100	6.71
MYZTA	0.231	90.5	0.093	99.0	0	100	1.250	43.7	0.009	98.8	0	100	6.74

M:Μεταμόρφωση, T:Τσιμέντο, Z:Ζαροσίτης, A:Αυτόκλειστο, Y:Υγρή

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα είναι τα εξής:

1. Υπάρχει η δυνατότητα Στερεοποίησης/Σταθεροποίησης λάσπης από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων με τη χρήση τσιμέντου CEM II, καθώς και μίγματος τσιμέντου CEM II με ίζημα ζαροσίτη/αλουνίτη χρησιμοποιώντας και τις δύο μεθόδους: 1) σε κανονικές και 2) σε επιταχυνόμενες συνθήκες.
2. Η δοκιμή εκχύλισης TCLP και η πρότυπη μέθοδος prEN 14405 έδειξαν υψηλά ποσοστά συγκράτησης των βαρέων μετάλλων στις φάσεις του τσιμέντου. Η συγκράτηση αυτή των μορίων των βαρέων μετάλλων στην πάστα του ενυδατωμένου τσιμέντου Πόρτλαντ είναι συνδυασμός περισσότερων της μίας χημικών διεργασιών.
3. Στα τέσσερα δείγματα (είτε χρησιμοποιώντας συνδετικό μόνο τσιμέντο είτε τσιμέντο - ζαροσίτη) είχαμε περίπου την ίδια συγκράτηση των βαρέων μετάλλων. Το γεγονός αυτό ενισχύει τη χρήση

του Ζ/Α ως συνδετικό καθώς προσφέρει μία οικονομική αλλά και αποδοτική μέθοδο κατεργασίας των λυμμάτων.

4. Η συγκράτηση των μετάλλων είναι παρόμοια για τα δείγματα τα οποία δημιουργήθηκαν στο εργαστήριο με αυτά που επεξεργάστηκαν σε αυτόκλειστο. Επομένως η επεξεργασία σε επιταχυνόμενες συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή δειγμάτων και την συγκράτηση των βαρέων μετάλλων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά την κ. Σ. Αγατζίνη-Λεονάρδου Καθηγήτρια του Εργαστηρίου Μεταλλουργίας και τον κ. Πασχάλη Ουσταδάκη Μόνιμο Ερευνητή του Εργαστηρίου για την παραγωγή και παροχή του ιζήματος ζαροσίτη/αλουνίτη και για την εν γένει συνεργασία τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Valls S., Vazquez E., (2002). 'Leaching properties of stabilized/solidified cement admixtures - sewage sludges systems', Waste Management 22, pp. 37-45.
2. Hage J.L.T. and Shuiling R.D. (2000). 'Comparative Column Elution of Jarosite Waste and its Autoclaved Product – Evidence for the Immobilization of Deleterious Elements in Jarosite', Minerals Engineering, Vol. 13, No3, pp. 287-296.
3. Industrial Exploitation of the Solid Wastes Produced from Hydrometallurgical Treatment of Greek Laterites. PENED '99.
4. Mymrin V. and Vaamond V.A. (1999). 'New construction materials from Spanish jarosite processing wastes.', Minerals Engineering Technical note, 12 (11), 1399-1402.
5. Katsioti M., Boura P., Agatzini-Leonardou S., Tsakiridis P. and Oustadakis P. (2003). 'Use of jarosite/alunite precipitate as a substitute for Gypsum in Portland Cement.', Cement and Concrete Composites, Vol. 27, p. 3-9.
6. U.S. Environmental Protection Agency, (1989). 'Stabilization/Solidification of CERCLA and RCRA Wastes: Physical Tests, Chemical Testing Procedures, Technology Screening and Field Activities', EPA/625/6-89/022, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC.
7. APHA – AWWA – WPCF. (1985). 'Standard methods for the examination of water and wastewater.', American Public Health Association, Washington.
8. Adams V.D. (1990). 'Water and wastewater examination manual.', Lewis Publishers, Michigan.
9. Kim H. Tan (1996). 'Soil sampling, preparation and analysis', Marcel Dekker, inc. U.S.A.
10. EN196-1 "Methods of testing cement – Determination of compressive strength".
11. P. Boura, M. Katsioti, P. Tsakiridis, A. Katsiri (2003). 'Stabilization / Solidification of sewage sludge', Pros. Int. Conf. BIOSOLIDS 2003, Wastewater Sludge as a Resource (eds Hallvard Ødegaard), Trondheim, Norway.
12. ASTM C 151-00 (2000). 'Standard Test Method for Autoclave Expansion of Portland Cement',
13. Επίσημη εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, (2002). 'Απόφαση του συμβουλίου της 19^{ης} Δεκεμβρίου 2002 (20003/33/EK)'.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΚΑΤΑΛΥΤΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ (FCC) ΩΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Σ.Κ. Αντίοχος¹, Ε. Χουλιάρα¹, Δ. Μπελεκούκας², Δ. Λαμπρινούδης² και Σ. Τσίμας¹

¹*Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

²*ΕΛ.ΠΕ ΑΕ*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η αξιοποίηση υλικών με ποζολανικές ή/και υδραυλικές ιδιότητες (*supplementary cementing materials*) αποτελεί μία από τις οδούς που επιβάλλεται να εξερευνηθεί πλήρως ο τομέας δόμησης προκειμένου να προσεγγίσει τακτικές βιώσιμης ανάπτυξης, μειώνοντας παράλληλα και το κόστος κατασκευής. Στα πλαίσια της εργασίας εξετάζεται η χρήση ενός χρησιμοποιημένου καταλύτη FCC των ΕΛ.ΠΕ ως δευτερεύοντος συμπληρωματικού υλικού. Το υλικό χαρακτηρίζεται φυσικοχημικά, ενώ επιχειρούνται δοκιμές εκπλυσσιμότητας βαρέων μετάλλων και ποζολανικού δυναμικού. Μελετάται επίσης η επιρροή του στην μηχανική συμπεριφορά σύνθετων τσιμέντων καθώς και η αποτελεσματικότητα μηχανικής του ενεργοποίησης. Ευρήματα που παρουσιάζονται στην εργασία συντείνουν πως ο συγκεκριμένος καταλύτης αποτελεί ισχυρή ποζολάνη (δραστικότερη μάλιστα από άλλες που χρησιμοποιούνται εκτενέστερα) και η συσσωμάτωση του σε σύνθετα συστήματα τσιμέντου είναι εφικτή.

Λέξεις κλειδιά: δευτερεύον υδραυλικό υλικό, FCC, σύνθετα τσιμέντα, ενεργό πυρίτιο, *k-value*.

EVALUATION OF A SPENT CATALYST FROM CRACKING PROCEDURES (FCC) FOR USE AS SUPPLEMENTARY CEMENTING MATERIAL

S.K. Antiohos¹, E. Chouliara¹, D. Belekoukias², D. Lamprinoudis² and S. Tsimas¹

¹*School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens*

²*ELPE S.A.*

ABSTRACT: Utilizing pozzolanic and/or latent hydraulic materials is one of the ways that the construction sector should look into in order to achieve sustainability and simultaneously lower the cost of construction. In the frame of this work, the feasibility of using a spent catalyst (FCC) as a supplementary cementing material was examined. The material was physicochemically characterized, whilst leaching and pozzolanic potential tests were carried out. Moreover, its effect on the strength development of blended cements and the impact of grinding on its reactivity were evaluated. Findings included in this investigation reveal that FCC is a strong catalyst (in fact more reactive than other pozzolans used extensively) and its incorporation in blended systems is feasible.

Keywords: supplementary cementing material, FCC, blended cement, reactive silica, efficiency factor

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χρησιμοποιημένος καταλύτης FCC, όπως αυτός προκύπτει από τις διεργασίες πυρόλυσης των διυλιστηρίων, είναι ένα αργιλοπυριτικό στερεό απόβλητο. Το γεγονός πως τόσο το πυρίτιο όσο και το αργίλιο που περιέχει δείχνουν να είναι δραστικά σε αλκαλικό περιβάλλον, σε συνδυασμό με την, κατά κανόνα, μεγάλη ειδική επιφάνεια του υλικού αποτέλεσαν το έναυσμα για την πραγματοποίηση, τα τελευταία χρόνια, πληθώρας ερευνητικών προσπαθειών γύρω από την πιθανή επαναχρησιμοποίηση του σε σωρεία εφαρμογών. Ο κατασκευαστικός τομέας επέδειξε πρόσφατα ανάλογο ενδιαφέρον δεδομένου πως για χρόνια ενσωματώνει επιτυχώς ανάλογα παραπροϊόντα σε διαδικασίες παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος. Η ανάγκη για αξιοποίηση στερών αποβλήτων με ποζολανικές ιδιότητες είναι επίκαιρη και επιτακτική όσο ποτέ δεδομένων των οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης που ευνοούν, όταν δεν επιβάλλουν, την εφαρμογή πρακτικών αειφόρου ανάπτυξης. Είναι άλλωστε αποδεδειγμένο, πως όταν χρησιμοποιηθούν κατάλληλα, τα δευτερεύοντα υδραυλικά υλικά, μπορούν να συνεισφέρουν, εκτός από την ελάφρυνση του περιβαλλοντικού κόστους (μέσω της μείωσης της απαιτούμενης ενέργειας και της διατήρησης των παραδοσιακών φυσικών πρώτων υλών), στην βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος [1].

Ειδικότερα για την περίπτωση του FCC, η σχετική έρευνα έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα μάλιστα με πρόσφατα αποτελέσματα [2] οι χρησιμοποιημένοι καταλύτες διαδικασιών πυρόλυσης δεν είναι επικίνδυνα (hazardous) στερεά απόβλητα και αντί να αποτίθενται στους χώρους υγειονομικής ταφής, θα πρέπει να εντάσσονται σε σύνθετα συστήματα τσιμέντου και σκυροδέματος δεδομένου πως δεν έχει παρατηρηθεί έκλυση βαρέων μετάλλων στα στραγγίσματα τους. Δουλεύοντας στην ίδια κατεύθυνση, οι Pacewska et al [3] εξέτασαν εκτενώς την φύση του καταλύτη, καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως η ικανότητα του και ο τρόπος με τον οποίο δεσμεύει διαθέσιμη υδράσβεστο που παράγεται στο πορώδες διάλυμα της τσιμεντόπαστας είναι ανάλογη αυτής του silica fume. Οι Paya et al [4] έφεραν εις πέρας μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη βιωσιμότητας τέτοιων υλικών σε δομικά συστήματα. Τα αποτελέσματα τους κατέδειξαν πως όταν ο καταλύτης FCC χρησιμοποιήθηκε σαν πρόσθετο συστατικό στο τσιμέντο, μπόρεσε να υποκαταστήσει μέχρι και 20% κ.β. τσιμέντο ή περίπου 10% κ.β. λεπτόκοκκων αδρανών (micro-filler) στο μίγμα χωρίς να επηρεάσει την ποιότητα του κονιάματος.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να αναλύσει την επίπτωση του απορριπτόμενου FCC σε ορισμένες από τις σημαντικές ιδιότητες των σύνθετων τσιμεντών που το ενσωματώνουν. Αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο μέρος μια συνεχιζόμενης ερευνητικής προσπάθειας που αποσκοπεί στον σχεδιασμό και την παραγωγή διμερών και τριμερών περιβαλλοντικά φιλικών τσιμεντών με συνδυασμούς στερεών Ελληνικών παραπροϊόντων. Προκαταρκτικά αποτελέσματα αναφορικά με τον χαρακτηρισμό του εγχώριου υλικού, την συμπεριφορά του σε δοκιμές εκπλυσιμότητας και ποζολανικού δυναμικού παρουσιάζονται πριν την ανάλυση της επιρροής αυτού στην ανάπτυξη μηχανικών αντοχών και ρυθμού αντίδρασης των εξεταζόμενων συστημάτων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Το FCC που παραλήφθηκε από την μονάδα πυρόλυσης των ΕΛ.ΠΕ στον Ασπρόπυργο είναι ένα άοσμο γκρίζο-άσπρο υλικό. Η χημική του ανάλυση καθώς και οι κύριες φυσικοχημικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Σημειώνεται πως ο προσδιορισμός των δραστικών οξειδίων του πυριτίου και ασβεστίου έγινε με βάση το EN 450-1, της υαλώδους φάσης με τις προτάσεις της RILEM (TC FAB-67 - Use of Fly Ash in Building), ενώ ως γ_s ορίζεται το δραστικό κλάσμα πυριτίου, όπως αυτός προκύπτει από τον λόγο του ενεργού προς το συνολικό πυρίτιο της ποζολάνης

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση και φυσικά χαρακτηριστικά πρώτων υλών

	Τσιμέντο	F _{cc}
CaO	65.01	0.47
CaO _f	0.63	-
SiO ₂	20.28	45.29
SiO _{2re} ^a	<i>n.a</i>	40.59
Al ₂ O ₃	4.75	48.70
Fe ₂ O ₃	3.76	1.88
MgO	1.61	0.25
SO ₃	2.55	-
R ₂ O	0.52	0.75
LOI	2.31	3.35
γ _s ^c	-	89.63
Ni Έκπλυμα (mg/L) ^d	-	0.07
Co Έκπλυμα (mg/L) ^d	-	<0.01
Αδιάλυτο Υπόλειμμα (%) ^a	0.18	22.67
Υαλώδης Φάση. S ^b (%)	-	77.33
Blaine Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	0.38	79
Ειδικό Βάρος	3.13	2.54

Στον ίδιο πίνακα περιέχονται τα αποτελέσματα της δοκιμής εκπλυσιμότητας (leaching test) η οποία πραγματοποιήθηκε με βάση το DIN 38414-S4. Στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα Co και Ni. Προς μελέτη της επίπτωσης της λεπτότητας του εξεταζόμενου παραπροϊόντος στην ποζολανική του δραστηριότητα, το υλικό ενεργοποιήθηκε μηχανικά με άλεση για 10 περίπου min σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο. Το αρχικό (as-received) και αλεσμένο υλικό συμβολίζονται στην εργασία ως F_{CC} και F_{CCG} αντίστοιχα. Πριν την εισαγωγή των δύο καταλυτών σε συστήματα με τσιμέντο, εκτιμήθηκε το ποζολανικό τους δυναμικό με την δοκιμή Chapelle. Σύμφωνα με αυτή την επιταχυνόμενη δοκιμή, προσδιορίστηκε το ποσοστό της υδρασβέστου που καταναλώθηκε από τους καταλύτες, σε υδατικό διάλυμα ποζολάνης:υδρασβέστου 1:1 το οποίο αντιδρά για 18 ώρες στους 105⁰C (τα αποτελέσματα εκφράζονται σε g υδρασβέστου που αντέδρασε προς g ποζολάνης που χρησιμοποιήθηκε).

Η επιρροή των F_{CC} και F_{CCG} στην εξέλιξη των μηχανικών αντοχών του τσιμέντου μελετήθηκε σε δοκίμια κονιαμάτων ακολουθώντας πιστά διαδικασίες που περιγράφονται σε προηγούμενες εργασίες (cementitious materials-to-sand ratio 1:3 και W/C_M 0.5) [5,6]. Πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση τσιμέντου από τους καταλύτες σε ποσοστό κ.β. έως και 30% και τα δοκίμια έσπασαν μετά από 1,2,7,28 και 90 ημέρες ενυδάτωσης. Παρασκευάστηκε επίσης δοκίμιο αναφοράς μόνο με τσιμέντο (control) για συγκριτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα των θλιπτικών αντοχών χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συντελεστών αποδοτικότητας κάθε συστήματος. Παράλληλα εξετάστηκε η εφαρμογή προσεγγιστικής σχέσης, που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη εργασία [7], η οποία συνδέει το περιεχόμενο ενεργό πυριτικό κλάσμα της ποζολάνης και τους συντελεστές αποδοτικότητας σε βάθος χρόνου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Χαρακτηρισμός και ιδιότητες F_{CC}

Τα δεδομένα του πίνακα 1 αποκαλύπτουν πως το F_{CC} είναι ένα ιδιαιτέρως άμορφο (όπως φαίνεται από την υψηλή τιμή του παράγοντα S) αργιλοπυριτικό υλικό με μεγάλη ειδική επιφάνεια και υψηλό ενεργό διοξείδιο του πυριτίου. Στην πραγματικότητα, σχεδόν όλο το πυρίτιο του είναι μη κρυσταλλικό όπως πιστοποιείται από την εντυπωσιακή τιμή του γ_s . Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό δεδομένου πως το άμορφο πυρίτιο (και όχι το συνολικό) είναι αυτό που συμμετέχει στις ποζολανικές αντιδράσεις. Προφανώς αυτός είναι και ο κύριος λόγος για το μεγάλο ποζολανικό δυναμικό και των δύο μορφών του καταλύτη (αρχικού και αλεσμένου) όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δοκιμής Chapelle (gCH καταναλώθηκαν /g F_{CC})

F_{CC}	F_{CCG}	T_F^a	T_M^a
0.73	0.82	0.60	0.72

^a Δοκίμια που εξετάστηκαν στα πλαίσια άλλης εργασίας [6]

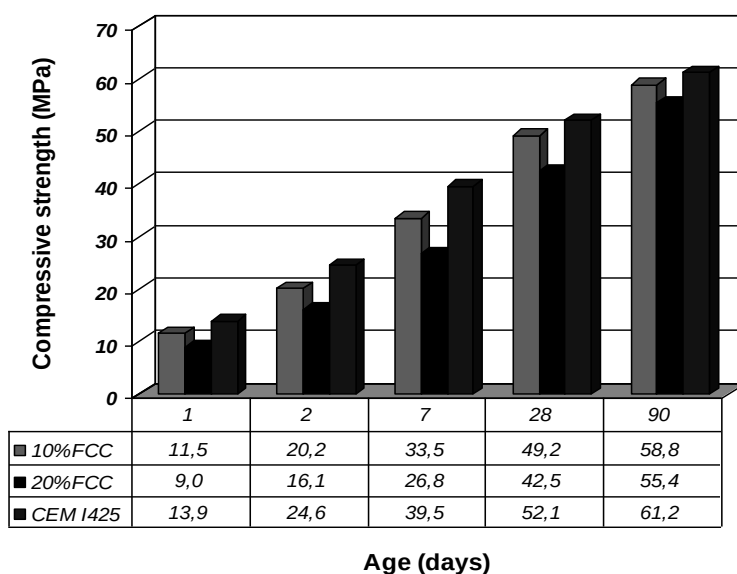
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της δοκιμής Chapelle των καταλυτών με τα αντίστοιχα για δύο είδη τεφρών (μία ασβεστούχα T_F από την Πτολεμαΐδα και μια πυριτική T_M περιοχής Μεγαλόπολης) διαπιστώνεται πως τόσο το F_{CC} όσο και το αλεσμένο F_{CCG} εμφανίζουν υψηλότερο ποζολανικό δυναμικό. Η δραστική επιρροή της διαδικασίας άλεσης φαίνεται καθαρά από το αναβαθμισμένο ποζολανικό δυναμικό του ενεργοποιημένου δείγματος το οποίο δεσμεύει την εντυπωσιακή ποσότητα των 0.82 g υδρασβέστου στο διάλυμα., γεγονός που είναι μια πρώτη ένδειξη πως η ποζολανική δραστικότητα του εν λόγω καταλύτη αποδίδεται τόσο στο διαθέσιμο ποσοστό ενεργών συστατικών όσο και στην ειδική επιφάνεια του.

Πολύ ικανοποιητική είναι και η συμπεριφορά του καταλύτη στην δοκιμή εκπλυσιμότητας (στα εκλούσματα οι συγκεντρώσεις τόσο του Co όσο και του Ni βρέθηκαν κάτω από τα όρια), γεγονός που καθιστά βιώσιμη την εισαγωγή του σε συστήματα με τσιμέντο. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου προτύπου αποτελούν μια ένδειξη πως το αντίστοιχο κονίαμα ή σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ασφαλώς σε σειρά κατασκευών, ωστόσο και ειδικά στην περίπτωση του σκυροδέματος με F_{CC} , μια πιο συγκεκριμένη δοκιμή εκπλυσιμότητας (η οποία θα περιλαμβάνει φαινόμενα διάχυσης) επιβάλλεται να εφαρμοστεί δεδομένου πως η έκπλυση είναι συχνά μια διαδικασία που ελέγχεται από φαινόμενα διάχυσης [8].

Μηχανική συμπεριφορά

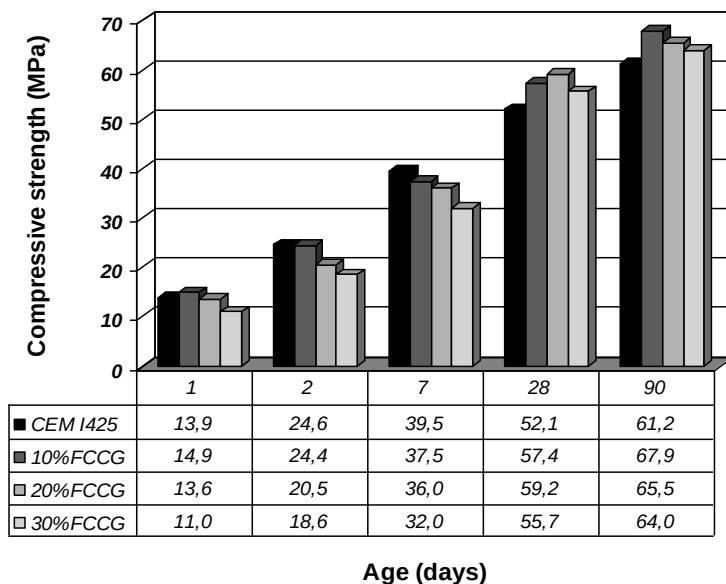
Η ανάπτυξη των θλιπτικών αντοχών των τσιμέντων με F_{CC} συναρτήσει του χρόνου συντήρησης και του ποσοστού αντικατάστασης παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Είναι εμφανές πως κατά την πρώτη εβδομάδα ενυδάτωσης, τα ποζολανικά δοκίμια αναπτύσσουν αντοχή πιο αργά από το δοκίμιο αναφοράς. Σε αυτό το στάδιο, η μείωση των αντοχών των ποζολανικών δοκιμίων είναι ανάλογη της ποσότητας του καταλύτη που περιέχεται σε αυτά. Προφανώς η εισαγωγή του καταλύτη (στην αρχική του μορφή) δεν μπορεί να αντισταθμίσει (στο αρχικό στάδιο) για την αντίστοιχη απώλεια των συστατικών του κλίνκερ τα οποία είναι υπεύθυνα για την ανάπτυξη των πρώιμων αντοχών. Με το πέρας της πρώτης εβδομάδας, οι αντοχές των δοκιμίων με καταλύτη είναι ανταγωνιστικές ως προς το δοκίμιο αναφοράς με το κονίαμα με 10% F_{CC} να αποδίδει καλύτερα από αυτό με 20% προσθήκη. Η σταδιακή βελτίωση των αντοχών των ποζολανικών δοκιμίων γίνεται ακόμα πιο εμφανής προς το τέλος της διαδικασίας ενυδάτωσης (90 ημέρες), οπότε οι αντοχές τους βελτιώνονται σημαντικά.. Διαφαίνεται πως ο ακατέργαστος καταλύτης δεν

είναι άμεσα διαθέσιμος για αντίδραση και συμβολή στην αντοχή του τσιμέντου αλλά η δραστηριότητα του αυξάνεται σταδιακά με τον χρόνο συντήρησης.



Εικόνα 1. Εξέλιξη θλιπτικών αντοχών σύνθετων τσιμέντων με F_{CC}

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης στα δοκίμια με τον μηχανικά ενεργοποιημένο καταλύτη. Συνήθως η αντικατάσταση τσιμέντου από αργιλοπυριτικά πρόσθετα επιφέρει μείωση των πρώιμων αντοχών. Αυτό δεν συμβαίνει ωστόσο σε περιπτώσεις όπου η προσθήκη αφορά σε υλικό τόσο λεπτό που μπορεί να ενισχύσει την συνεκτικότητα (packing) του συστήματος αλλά και τόσο ενεργό ώστε να μπορέσει να επιταχύνει τον ρυθμό της ενυδάτωσης του τσιμέντου και επιπλέον να αυξήσει την ποσότητα του δημιουργούμενου ένυδρου πυριτικού ασβεστίου C-S-H, ενισχύοντας έτσι την αντοχή του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 2. Εξέλιξη θλιπτικών αντοχών σύνθετων τσιμέντων με ενεργοποιημένο F_{CC}

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 2 πιστοποιούν πως οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται στην περίπτωση του αλεσμένου καταλύτη, δεδομένης της εξαιρετικής απόδοσης των σύνθετων τσιμέντων που τον ενσωματώνουν από την έναρξη της ενυδάτωσης. Ενδεικτικό είναι το γεγονός πως το τσιμέντο με 10% F_{CCG} ξεπερνά το δοκίμια αναφοράς μετά από μόνο 2 ημέρες ενυδάτωσης, ενώ στο τέλος της πρώτης εβδομάδας, όλα σχεδόν τα ποζολανικά κονιάματα εμφανίζουν ανωτερότητα η οποία και διευρύνεται με τον χρόνο συντήρησης. Είναι πιθανόν πως, όταν το διάστημα συντήρησης είναι μικρό (7 ημέρες), περιορισμένη ποσότητα υδρασβέστου παράγεται με αποτέλεσμα, ο καταλύτης, μολονότι ενεργός εξαρχής, δεν μπορεί να εκδηλώσει πλήρως την ποζολανική του δράση, με αποτέλεσμα ένα σημαντικό μέρος του να δρα ως πληρωτικό υλικό (micro-filler). Αυτό εξηγεί και την καλύτερη απόδοση των τσιμέντων με μικρή προσθήκη καταλύτη στις πρώτες ηλικίες (10%), ενώ όσο εξελίσσεται η ενυδάτωση (και περισσότερη υδράσβεστος παράγεται) τα δοκίμια με μεγαλύτερο ποσοστό καταλύτη αποδίδουν καλύτερα. Η εξαιρετική συμπεριφορά των σύνθετων τσιμέντων με τον ενεργοποιημένο καταλύτη συνάδει με το υψηλό ποζολανικό δυναμικό αυτού, όπως είχε δείχθει στα πλαίσια της δοκιμής Chapelle.

Συντελεστές αποδοτικότητας & πιστοποίηση προσεγγιστικής σχέσης

Έχει επανειλημμένως δείχθει [7,9] πως στην περίπτωση κονιαμάτων ή σκυροδέματος που ενσωματώνουν δευτερεύοντα υδραυλικά υλικά ο συντελεστής αποδοτικότητας (k-value) δίνεται από την σχέση:

$$f_c = K \left(\frac{1}{W/(C+kP)} - a \right) \quad (1)$$

όπου f_c η θλιπτική αντοχή (MPa) του σκυροδέματος, W είναι η περιεκτικότητα σε νερό του αρχικού μίγματος σκυροδέματος (kg/m^3), C η περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m^3), P είναι η ποζολάνη που εισήχθη στο σκυρόδεμα (kg/m^3), K μία παράμετρος που εξαρτάται από τον τύπο τσιμέντου (στην παρούσα εργασία ίση με 38.8 MPa) και a μία παράμετρος που εξαρτάται κυρίως από τον χρόνο και συνθήκες συντήρησης. Χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση και τις τιμές των θλιπτικών αντοχών (Εικόνες 1 και 2), υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στον πίνακα 3, οι συντελεστές ενεργότητας για αντιπροσωπευτικά δοκίμια.

Πίνακας 3. Ενδεικτικά k-values για διάφορα σύνθετα κονιάματα

	k-values		
	Age (days)		
	2	28	90
$10F_{cc}$	0,43	0,63	0,69
$10F_{CCG}$	0,97	1,68	1,86
$20F_{CCG}$	0,74	1,46	1,28
$30F_{CCG}$	0,74	1,15	1,12
$20F_{CCG}$ -(using eq.2)	0,63	1,35	1,59

Τα δεδομένα του Πίνακα 3 δεικνύουν την μέτρια δραστηριότητα του καταλύτη όταν αυτός εισήχθη στο μίγμα όπως παρελήφθη από την παραγωγό εταιρία. Το γεγονός πως ακόμα και μετά από 3 μήνες συντήρησης ο συντελεστής k για το τσιμέντο με 10% καταλύτη παραμένει κάτω της μονάδας δεικνύει πως μια συγκεκριμένη απώλεια στην θλιπτική αντοχή του τσιμέντου πρέπει να αναμένεται στην περίπτωση που δεν έχει προηγηθεί άλωση του καταλύτη. Ωστόσο όταν αυτός αλέστηκε, το σύστημα ενισχύθηκε σε θλιπτική αντοχή όπως πιστοποιείται και από τις υψηλές τιμές των αντίστοιχων συντελεστών k, οι οποίοι εμφανίζονται σημαντικά αυξημένοι σε σύγκριση με

τους αντίστοιχους άλλων πολύ ενεργών ποζολανών, όπως ο μετακαολίνης (MK) και η τέφρα φλοιού ρυζιού (RHA) [9].

Σε πρόσφατη εργασία [7], αναπτύχθηκε για πρώτη φορά αναλυτική θεωρητική σχέση που συνδέει το ενεργό πυρίτιο τεχνητών ποζολανών με τον συντελεστή k των συστημάτων που τις ενσωματώνουν, με σκοπό μια πρώτη προσέγγιση της απόδοσης αυτών γνωρίζοντας μόνο την περιεκτικότητα της χρησιμοποιούμενης ποζολάνης σε άμορφο πυρίτιο. Οι συγγραφείς κατέληξαν πως για ένα σύνθετο σύστημα τσιμέντου με ενεργή προσθήκη, ο συντελεστής k δίνεται από τον τύπο:

$$k = (\gamma_s \cdot f_{s,p} / f_{s,c}) (1 - a W/C) \quad (2)$$

όπου : γ_s είναι το δραστικό πυριτικό κλάσμα της ποζολάνης (δίνεται στον Πίνακα 1), and $f_{s,p}$ and $f_{s,c}$ είναι τα κλάσματα του πυριτίου στον καταλύτη και στο τσιμέντο αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας την εξίσωση (2) για την περίπτωση του τσιμέντου 20F_{CCG} (ποσοστό αντικατάστασης επαρκές για εκδήλωση ποζολανικής δράσης αλλά ταυτόχρονα όχι μεγάλο σε βαθμό να επηρεάσει δραστικά τον ρυθμό αντίδρασης των στοιχείων του τσιμέντου) θεωρητικές τιμές σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές υπολογίστηκαν για όλες σχεδόν τις ηλικίες που εξετάστηκαν. Η ασυμφωνία που παρατηρείται στις 90 ημέρες μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός πως όχι όλος ο καταλύτης έχει αντιδράσει μέχρι αυτό το στάδιο, συνεπώς ένα ποσοστό του περιεχόμενου ενεργού πυριτίου αναμένεται να προσδώσει επιπλέον αντοχή σε βάθος χρόνου.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξετάστηκε η πιθανότητα χρησιμοποίησης απενεργοποιημένου καταλύτη F_{CC} ως δευτερεύοντος υδραυλικού υλικού σε σύνθετα συστήματα τσιμέντου. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στην συνέχεια:

1. Ο καταλύτης F_{CC} στην μορφή στην οποία παρελήφθη εμφάνισε υψηλό ποζολανικό δυναμικό το οποίο αυξήθηκε μετά από σύντομη μηχανική ενεργοποίηση. Πολύ καλή ήταν και η συμπεριφορά του σε συνθήκες εκπλυσιμότητας, αφού οι συγκεντρώσεις των εκλουσμάτων των προς εξέταση βαρέων μετάλλων βρέθηκαν κάτω από τα επιτρεπτά όρια. Και τα δύο αυτά κριτήρια καθιστούν δυνατή την εισαγωγή του καταλύτη σε συστήματα τσιμέντου.
2. Η δοκιμή θλίψης σε κονιάματα με προσθήκη καταλύτη κατέδειξε πως το F_{CC} επιφέρει μικρή μείωση των πρώιμων ιδιαίτερα αντοχών. Αντίθετα το αλεσμένο F_{CC} βελτίωσε αισθητά τις μηχανικές αντοχές του τσιμέντου από την αρχή της ενυδάτωσης, ακόμα και όταν εισήχθη σε σημαντικό ποσοστό (30% κ.β.).
3. Υψηλοί συντελεστές αποδοτικότητας προσδιορίστηκαν για τα νέα τσιμέντα με τον ενεργοποιημένο καταλύτη, τιμές σαφώς μεγαλύτερες από αυτές των τσιμέντων με άλλες ενεργές προσθήκες όπως ιπτάμενη τέφρα, σκωρία, μετακαολίνη και τέφρα φλοιού ρυζιού.
4. Πιστοποιήθηκε η προβλεπτική δύναμη και αξιοπιστία θεωρητικής σχέσης που συνδέει το ενεργό πυρίτιο τεχνητών ποζολανών με τον συντελεστή k των συστημάτων που τις ενσωματώνουν. Η εφαρμογή αυτής της προσεγγιστικής σχέσης μπορεί να οδηγήσει σε μια πρώτη, σχετικά ασφαλή, πρόβλεψη της μελλοντικής μηχανικής συμπεριφοράς συστημάτων τσιμέντου και σκυροδέματος με τον εν λόγω καταλύτη.

- [1] P.K. Mehta, *Role of pozzolanic and cementitious materials in sustainable development of the concrete industry*, 6th CANMET/ACI international conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Malhotra V.M. (ed), I, (1998) 1-20
- [2] N. Su, H. Fang, Z. Chen, F. Liu, *Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution*, Cement and Concrete Research **30**: (2000) 1773-1783.
- [3] B. Pacewska, I. Wilinska, J. Kubissa, *Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive*, Thermochimica Acta **322**: (1998) 175-181.
- [4] J. Paya, J. Monzo, M. V. Borrachero, *Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements*, Cement and Concrete Research **31**: (2001) 57-61.
- [5] S. Antiohos, S. Tsimas, *Investigating the role of active silica in the hydration mechanisms of high-calcium fly ash/cement systems*, Cement and Concrete Composites **27**: (2005) 171-181.
- [6] S. Antiohos, K. Maganari, S. Tsimas, *Evaluation of blends of high and low calcium fly ashes for use as supplementary cementing materials*, Cement and Concrete Composites **27**: (2005) 349-356.
- [7] V.G Papadakis, S. Antiohos, S. Tsimas, *Supplementary cementing materials in concrete – Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor*, Cement and Concrete Research **32**: (2002) 1533-1538.
- [8] Q. Yu, S. Nagataki, J. Lin, T. Saeki, M. Hisada, *The leachability of heavy metals in hardened fly ash cement and cement-solidified fly ash*, Cement and Concrete Research (in press, corrected proof) (2005).
- [9] Papadakis, V.G., Tsimas, S. *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Building-Sector Growth*, European Commission DGXII, Marie Curie Fellowship, Final Scientific Report, Project No HPMF-CT-1999-00370, National Technical University of Athens, Greece, 2001.

ΧΡΗΣΗ ΣΚΩΡΙΩΝ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΥΒΟΛΙΘΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑΣ

Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου, Ε. Χαριτάκης, Δ. Ζάμπογλου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται πειραματική έρευνα για την αντικατάσταση των συμβατικών αδρανών από αδρανή σκωρίας χαλυβουργίας στην παραγωγή κυβόλιθων. Παρουσιάζονται οι έλεγχοι καταλληλότητας των σκωριών ως αδρανή, τα κριτήρια επιλογής και οι βέλτιστες κοκκομετρικές καμπύλες και συνθέσεις σκυροδέματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται πιλοτική παραγωγή με αδρανή σκωρίας που έγινε στη βιομηχανική μονάδα της TEXNOMΠETON Α.Ε. Ένας ικανοποιητικός αριθμός κυβόλιθων με αυτά τα αδρανή υποβλήθηκε στους απαιτούμενους από τις προδιαγραφές ελέγχους και επισημάνθηκαν τα προβλήματα στην όλη διαδικασία παραγωγής. Βάσει των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι είναι δυνατή η παραγωγή κυβόλιθων με αδρανή σκωρίας με σημαντικά πλεονεκτήματα, κυρίως όσον αφορά την αντοχή σε τριβή και την ανθεκτικότητα.

Λέξεις κλειδιά: κυβόλιθοι, σκυρόδεμα, αδρανή σκωρίας, ανθεκτικότητα .

USE OF STEEL SLAG AGGREGATES IN THE PRODUCTION OF CONCRETE PAVING BLOCKS

I. Papayianni, E. Anastasiou, E. Charitakis, D. Zaboglou

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.

ABSTRACT: In this report is presented an experimental study on the replacement of limestone aggregates with steel slag aggregates for the production of concrete paving blocks. The report consists of suitability tests for steel slags as aggregates, selection criteria, optimum granulometry curves and concrete mixtures. Following these, a demonstration factory production of concrete paving blocks took place in the facilities of TECHNOBETON S.A. A sufficient number of concrete paving blocks with steel slag aggregates was subjected to the tests prescribed in the appropriate standards and flows in the production process were identified. Based on the results, it seems possible to produce concrete paving blocks with steel slag aggregates with considerable advantages, mainly regarding abrasion resistance and durability.

Keywords: concrete paving blocks, concrete, steel slag aggregates, durability

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σκωρία αποτελεί προϊόν της καμίνευσης του scrap για την παραγωγή δομικού χάλυβα με τη μέθοδο Temcore. Το υλικό ψύχεται και διαβαθμίζεται σε κλάσματα αδρανών. Η παγκόσμια παραγωγή υπολογίζεται γύρω στους 100εκ. τόνους ετησίως. Στην Ευρώπη παράγονται περίπου 12 εκ. τόνοι. Στην Ελλάδα 0.5 εκ. τόνοι. Η αξιοποίηση των σκωριών ποικίλει από χώρα σε χώρα. Στη Γερμανία μόνο το 7% απορρίπτεται στο περιβάλλον. Σε άλλες χώρες το αναξιοποίητο προϊόν φτάνει το 35%.

Η χρήση των σκωριών ως αδρανών κυρίως στην οδοποιία εμφανίζεται ήδη από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ. Το μεγάλο φαινόμενο ειδικό βάρος και η εξαιρετική σκληρότητα και τραχύτητα των αδρανών είναι τα βασικά χαρακτηριστικά που οδήγησαν στη χρήση τους στην κατασκευή δρόμων μεγάλης αντοχής (για στρατιωτικούς σκοπούς). Στην Ελλάδα παρόλο που η παραγωγή σκωριών χρονολογείται από τη δεκαετία του 1960, σχετικά πρόσφατα άρχισε η εφαρμογή τους ως αδρανές οδοποιίας. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η εφαρμογή των σκωριών ως αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος και ειδικότερα προϊόντων άοπλου σκυροδέματος όπως είναι οι κυβόλιθοι διάστρωσης δαπέδων πεζοδρομίων ή οι κυβόλιθοι οδοστρώσας.

Στο πρώτο στάδιο της εργασίας έγινε η προκαταρκτική έρευνα στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών που αφορούσε τον έλεγχο καταλληλότητας των σκωριών ως αδρανών και την παραγωγή και έλεγχο συνθέσεων σκυροδέματος με αδρανή σκωρίας. Ως υλικό των σκωριοαδρανών χρησιμοποιήθηκαν τα αποκαμινεύματα της χαλυβουργίας ΣΙΔΕΝΟΡ που παρείχε διαβαθμισμένα η εταιρεία ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ.

Στο δεύτερο στάδιο έγινε πιλοτική παραγωγή κυβολίθων με σκωριοαδρανή σε συνεργασία με την ΤΕΧΝΟΜΠΕΤΟΝ ΑΕ (7^ο χλμ. Κοζάνης – Πτολεμαΐδας) που διέθεσε τη γραμμή παραγωγής και όλη την υποδομή της για το σκοπό αυτό. Οι κυβόλιθοι στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο όπου ελέγχθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Συνολικά ένας αριθμός περίπου 250 δοκιμών υποβλήθηκε σε δοκιμασίες όπως θλίψη, εφελκυσμό από κάμψη, διάρρηξη, ανεκτικότητα σε απότριψη, υδαταπορροφητικότητα, προκειμένου να έχουμε όσο το δυνατόν αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η εργασία αυτή έγινε το 2004-2005 στο πλαίσιο των στόχων της μη κερδοσκοπικής εταιρείας «ΕΒΙΠΑΡ» που εδρεύει στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών χωρίς καμιά χρηματοδότηση.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στόχος της προκαταρκτικής έρευνας στο εργαστήριο ήταν ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών των αδρανών και η αναζήτηση της βέλτιστης σύνθεσης με τη μέγιστη δυνατή πυκνότητα όγκου αδρανών και την ελάχιστη ποσότητα τσιμέντου ανά m³. Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Ι 42.5, αδρανή σκωρίας που παρείχε η ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΑΕ σε διαβαθμίσεις 0-4 mm, 5-12 mm, άμμος ποτάμια 0-4 mm, ρευστοποιητής της Rheobuilt της MAC BETON HELLAS.

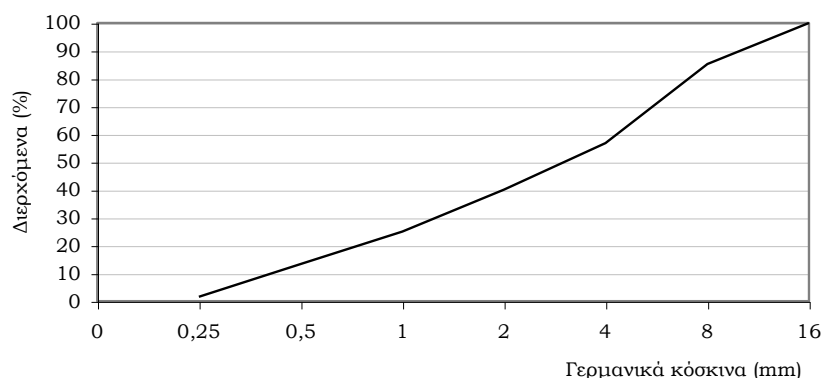
Τα χαρακτηριστικά των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν:

Φαινόμενο Ειδ. Βάρος άμμου 2.65 gr/ml - Σκωρίας 3.10 gr/ml

Υγρασία άμμου 2.7% - Σκωρίας 1.4%

Η κοκκομετρική σύνθεση των αδρανών που επιλέχθηκε αντιστοιχεί στην καμπύλη:

Καμπύλη προδιαγραφών



Εικόνα 1. Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης εργαστηρίου Δομικών Υλικών.

Συνιστάται από 27.7% σκωρία 0-4 mm, 27.7% άμμο ποταμού 0-4 mm, και 44.6% σκωρία 5-12 mm. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν εμπίπτουν στις γενικές προδιαγραφές κοκκομετρικής διαβάθμισης κατά EN 12620:2002.

Οι αναλογίες σύνθεσης σκυροδέματος που δοκιμάστηκε στο εργαστήριο δίνονται παρακάτω:

Πίνακας 1. Αναλογίες σύνθεσης εργαστηριακού σκυροδέματος

Υλικό	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m ³)
Τσιμέντο	270
Ρύζι σκωρίας	1023
Άμμος σκωρίας	635
Άμμος ποταμίσια	635
Ρευστοποιητής	8
Νερό	123

Ο χρόνος Vebe για τη μέτρηση εργασιμότητας ήταν 30 sec.

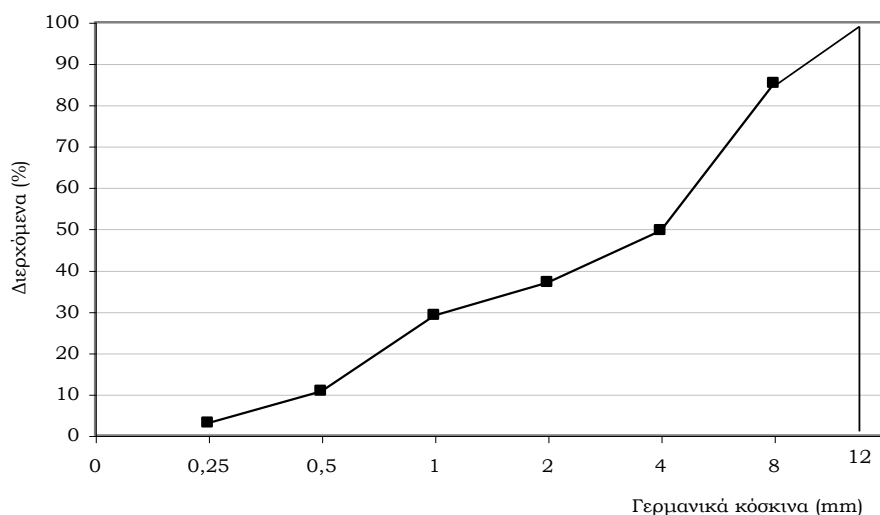
Παρήχθησαν μόνο κυβικά δοκίμια που ελέγχθηκαν σε θλίψη και διάρρηξη.

Η αντοχή σε θλίψη που επιτεύχθηκε σε 28ημ. ήταν 42 MPa και η αντοχή σε διάρρηξη κύβων (15x15x15) 3.49 MPa.

Στο δεύτερο στάδιο έγινε παραγωγή κυβολίθων με αδρανή σκωρίας στη βιομηχανική μονάδα TEXNOMPIETON AE

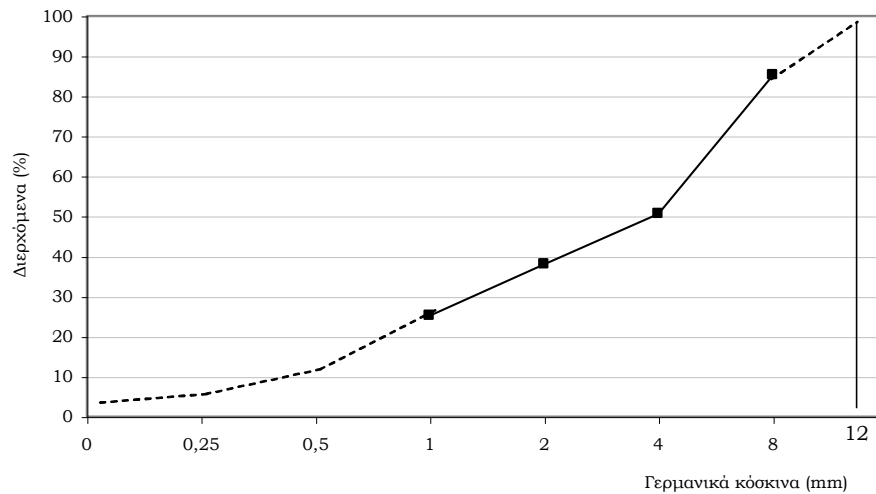
Στο εργαστήριο που διαθέτει η εταιρεία έγινε ο προσδιορισμός των υγρασιών των αδρανών και οι τροποποιήσεις των κοκκομετρικών συνθέσεων σύμφωνα με τα υπάρχοντα υλικά στη Βιομηχανική Μονάδα. Τα αδρανή σκωρίας είχαν διατεθεί από την ΑΕΙΦΟΡΟ Α.Ε. σε τέσσερα κλάσματα 0-1.5 mm, 1.5-2.5 mm, 2.5-4 mm και 5-12 mm. Διαθέσιμα υπήρχαν επίσης ασβεστολιθικά αδρανή (Αλωνάκια Κοζάνης). Μετά από τις επί μέρους κοκκομετρικές αναλύσεις προέκυψαν οι παρακάτω κοκκομετρικές συνθέσεις των αδρανών για τις συνθέσεις των κυβολίθων.

Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 0-1.5 mm:	228 kgr → 30%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 1.5-2.5 mm:	75.9 kgr → 10%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 2.5-4 mm:	114 kgr → 15%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 5-12 mm:	341 kgr → 45%



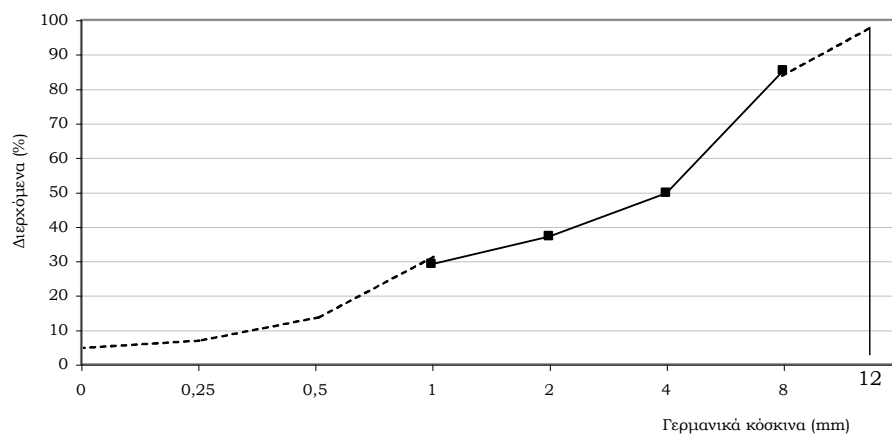
Εικόνα 2. Κοκκομετρική καμπύλη 1^{ης} εργοστασιακής σύνθεσης

Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 0-1.5 mm:	190 kgr → 25%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 1.5-2.5 mm:	95 kgr → 12,5%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 2.5-4 mm:	95 kgr → 12,5%
Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 5-12 mm:	341 kgr → 45%
Αδρανή ασβεστ/κής προέλευσης 0-1.5 mm:	38 kgr → 5%



Εικόνα 3. Κοκκομετρική καμπύλη 3^{ης} εργοστασιακής σύνθεσης

Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 0-1.5 mm: 107.4 kgr → 15%
 Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 1.5-2.5 mm: 71.6 kgr → 10%
 Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 2.5-4 mm: 107.4 kgr → 15%
 Αδρανή σκωρίας διαβάθμισης 5-12 mm: 322.2 kgr → 45%
 Αδρανή ασβεστολιθικής προέλευσης 0-1.5 mm: 107.4 kgr → 15%



Εικόνα 4. Κοκκομετρική καμπύλη 4^{ης} εργοστασιακής σύνθεσης

Βάσει των τριών κοκκομετρικών καμπυλών προέκυψαν οι παρακάτω συνθέσεις

Πίνακας 2. Περιεκτικότητα υλικών στην 1^η εργοστασιακή σύνθεση

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m ³)
Τσιμέντο	69	230
Σκωρία 0-1.5	228	760
Σκωρία 1.5-2.5	75.9	253
Σκωρία 2.5-4	114	380
Σκωρία 5-12	341	1137
Νερό (συνολικά)	24.8	83

Πίνακας 3. Περιεκτικότητα υλικών στην 2^η εργοστασιακή σύνθεση

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m ³)
Τσιμέντο	25	265
Σκωρία 0-1.5	84	890
Ασβεστολιθικά 0-1.5	75	795
Σκωρία 1.5-2.5	67.2	710
Νερό (συνολικά)	9.4	100

Πίνακας 4. Περιεκτικότητα υλικών στην 3^η εργοστασιακή σύνθεση

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m ³)
Τσιμέντο	69.0	230
Σκωρία 0-1.5	190.0	633
Σκωρία 1.5-2.5	95.0	317
Σκωρία 2.5-4	95.0	317
Σκωρία 5-12	341.0	1137
Ασβεστολιθικά 0-1.5	38.0	127
Νερό (συνολικά)	24.8	83

Πίνακας 5. Περιεκτικότητα υλικών στην 4^η εργοστασιακή σύνθεση

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m ³)
Τσιμέντο	90.0	300
Σκωρία 0-1.5	107.4	358
Σκωρία 1.5-2.5	71.6	239
Σκωρία 2.5-4	107.4	358
Σκωρία 5-12	322.2	1074
Ασβεστολιθικά 0-1.5	107.4	358
Νερό (συνολικά)	32.4	108

Επιπλέον για λόγους σύγκρισης ελέχθηκαν κυβόλιθοι με συμβατικά ασβεστολιθικά αδρανή οι οποίοι παρήχθησαν από την παρακάτω σύνθεση.

Πίνακας 6. Περιεκτικότητα υλικών στους κυβόλιθους που παράγονται χωρίς χρήση σκωρίας

Υλικό	Βάρος (kg)	Περιεκτικότητα στο μείγμα (kg/m ³)
Τσιμέντο	144.0	229
Ασβεστολιθικά 0-4 mm	1440.0	2286
Νερό (συνολικά)	52.0	83

Σημειώνεται επίσης ότι οι κυβόλιθοι που έχουν κωδικό 2 έχουν παραχθεί με διπλή στρώση. Η κάτω στρώση αποτελείται από τη σύνθεση 1 και η άνω στρώση από τη σύνθεση 2.

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Χρησιμοποιήθηκε το αυτοματοποιημένο σύστημα παραγωγής της μονάδας

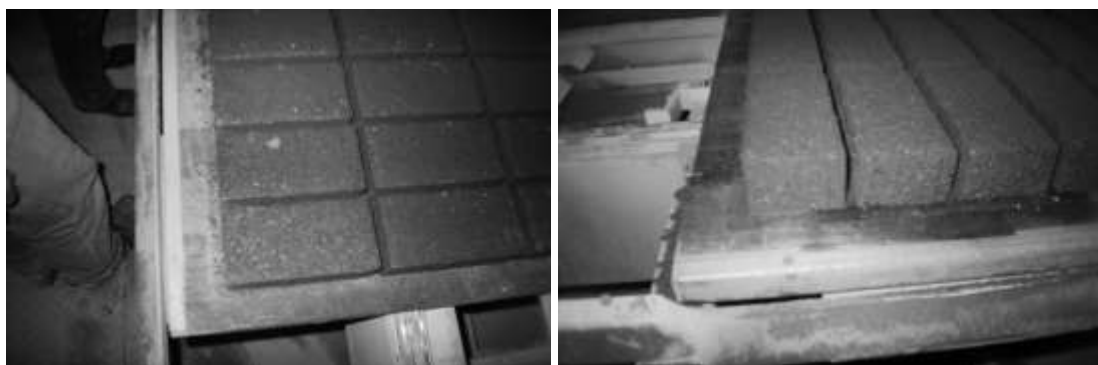


Εικόνα 5. Μηχανοποιημένο σύστημα παραγωγής Εικόνα 6. Σύστημα μορφοποίησης κυβολίθων

Και στη συνέχεια η εξαγωγή των κυβολίθων πάνω στις παλέτες και η αποθήκευση για ωρίμανση



Εικόνα 7. Στάδιο εξαγωγής κυβολίθων



Εικόνες 8, 9. Όψη κυβολίθων μονής στρώσης αμέσως μετά την παραγωγή

ΕΛΕΓΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι κυβόλιθοι ελέγχθηκαν σε θλίψη κατά EN (12390-3):



Εικόνα 10. Δοκιμή θλίψης σε κυβόλιθο οδοστρώσας

Σε διάρρηξη κατά (EN1338):



Εικόνα 11. Διάρρηξη κυβολίθων



Εικόνα 12. Δοκιμή κάμψης σε κυβόλιθο

Σε όλους τους κυβόλιθους εφαρμόστηκε σονομέτρηση:



Εικόνα 13. Διαδικασία Σονομέτρησης

Πραγματοποιήθηκε επίσης έλεγχος σε απότριψη (ASTM C779):



Εικόνα 14. Μηχανή απότριψης εν ώρα λειτουργίας



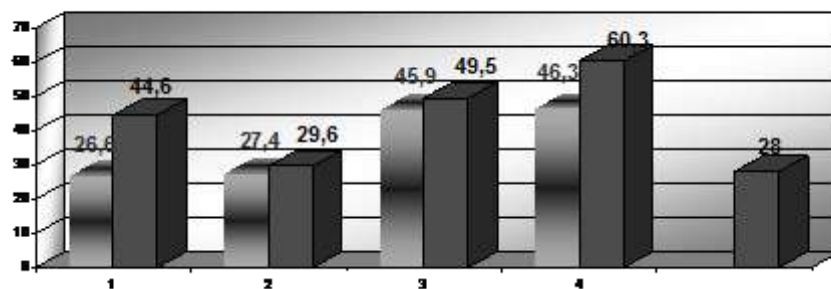
Εικόνα 15. Δοκίμιο μετά από δοκιμή απότριψης



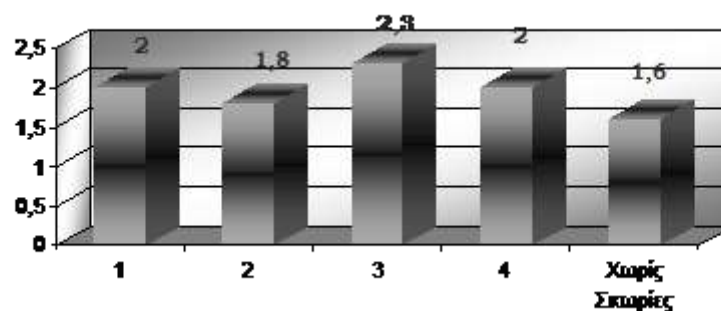
Εικόνα 16. Μέτρηση φθοράς

Και έλεγχος υδατοαπορροφητικότητας κατά EN1338.

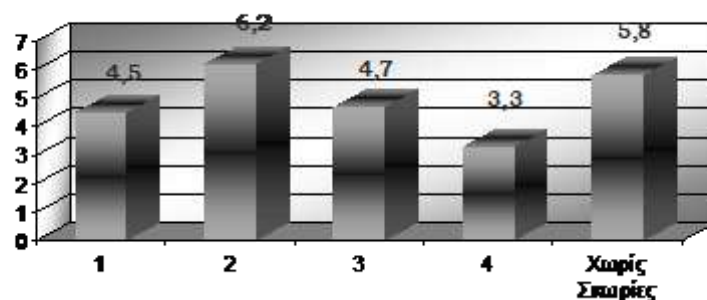
Οι μέσοι όροι των αποτελεσμάτων θραύσης των κυβολίθων δίνονται στα παρακάτω ιστογράμματα.



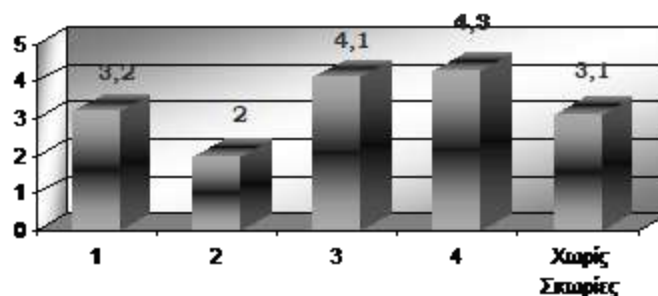
Εικόνα 17. Θλιπτική αντοχή 7 και 28 ημερών ορθογωνικών δοκιμίων



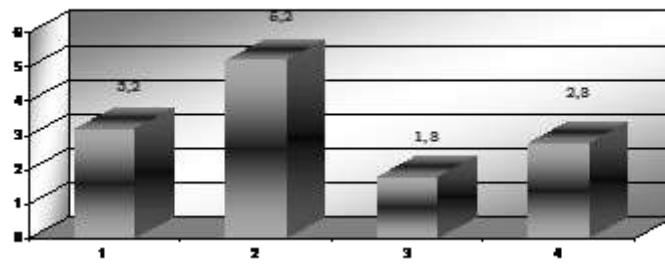
Εικόνα 18. Αντοχή σε διάρρηξη



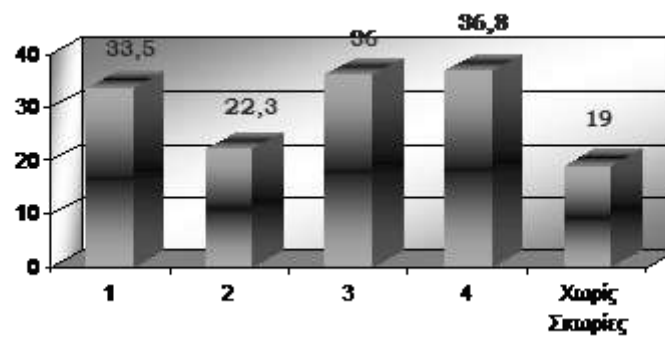
Εικόνα 19. Ποσοστό % της αντοχής σε διάρρηξη προς τη θλιπτική αντοχή



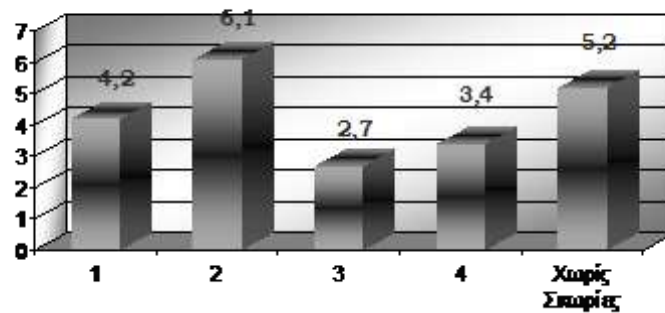
Εικόνα 20. Αντοχή σε κάμψη



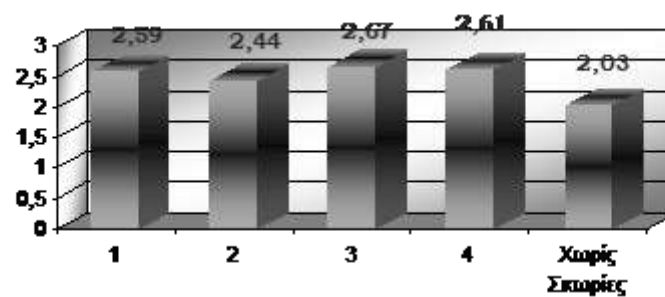
Εικόνα 21. Μέσο βάθος αυλάκωσης (mm)



Εικόνα 22. Δυναμικό Μέτρο Ελαστικότητας



Εικόνα 23. Ποσοστό νερού που απορροφάται από τα δοκίμια



Εικόνα 24. Ειδικό βάρος (gr/cm³)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Για τη παραγωγή κυβολίθων στη βιομηχανική μονάδα τροποποιήθηκαν οι συνθέσεις σκυροδέματος που ήδη χρησιμοποιούνταν στη παραγωγή κυρίως ως προς τα αδρανή. Δεν έγινε νέος σχεδιασμός συνθέσεως σκυροδέματος για την επίτευξη των απαιτήσεων σύμφωνα με τους υπάρχοντες κανονισμούς για κυβόλιθους οδοστρώσις

Ο στόχος ήταν να γίνει η σύγκριση με τους ήδη διατιθέμενους στην αγορά κυβολίθους πεζοδρόμησης ώστε να μπορεί να μπει στην κατανάλωση ως αδρανές η σκωρία με του ίδιου επιπέδου κοστολόγιο παραγωγής.

Στη δοκιμαστική προκαταρκτική σύνθεση που έγινε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών φάνηκε ότι είναι δυνατόν να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα αντοχής με σχετικά χαμηλό ποσοστό τσιμέντου (270kg/m^3)

Σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό EN-1338 για κυβόλιθους οδοστρώσις σε συνδυασμό με τον Αμερικάνικο TS-2824 ορίζονται: μέγιστα μεγέθη διαστάσεων $240 \times 160 \times 140\text{ mm}$

Αντοχή σε θλίψη: 50 MPa

Αντοχή σε διάρρηξη: 2,9 MPa

Υδατοαπορροφητικότητα < 6%

Αντοχή σε απότριψη: 6mm βάθος αυλάκωσης

Είναι προφανές ότι δεν έχει γίνει σχεδιασμός για αυτά τα επίπεδα αντοχής εφόσον οι ήδη παραγόμενοι κυβόλιθοι δεν προορίζονται για οδοστρώσις αλλά για πεζοδρόμηση.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων κυβολίθων με αδρανή ασβεστολιθικά και αδρανή σκωρίας προκύπτει ότι :

- Οι κυβόλιθοι με αδρανή σκωρίας παρουσιάζουν αισθητά υψηλότερη αντοχή σε διάρρηξη που είναι καθοριστικό μέγεθος για τους κυβόλιθους.
- Οι υψηλότερες αντοχές που προκύπτουν παρουσιάζονται στους κυβόλιθους με αδρανή σκωρίας με τσιμέντο 300 kg/m^3 .
- Οι κυβόλιθοι της σύνθεσης με αδρανή σκωρίας και τσιμέντο 230 kg/m^3 παρουσιάζουν αντοχή 50 MPa, υψηλότερη των αντιστοίχων με ασβεστολιθικά αδρανή
- Η υδατοαπορροφητικότητα είναι χαμηλή, του ίδιου επιπέδου με τους κυβόλιθους με αδρανή ασβεστολιθικά
- Στην απότριψη καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι κυβόλιθοι του αναμίγματος με ποσό τσιμέντου 230 kg/m^3

Κρίνεται σκόπιμο ότι περαιτέρω έλεγχοι ανθεκτικότητας απαιτούνται για την πλήρη τεκμηρίωση της χρήσης των σκωριών ως αδρανών στους κυβόλιθους

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το Εργαστήριο Δομικών Υλικών ευχαριστεί τις βιομηχανίες ΑΕΙΦΟΡΟ Α.Ε. και ΤΕΧΝΟΜΠΕΤΟΝ για την άριστη συνεργασία και την συνεισφορά τους στην έρευνα για αυτή την εφαρμογή.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Αναστασίου Ε. - Παπαδόπουλος Λ., 'Έλεγχος καταλληλότητας σκωριών (αποκαμινευμάτων χαλυβουργίας) για την παραγωγή σκυροδέματος (RCC) ειδικών εφαρμογών' Διπλωματική εργασία Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη 2000.
2. Beshr H.-Almusallam A.A., 'Effect of coarse aggregates quality on the mechanical properties of high strength concrete', Construction and Building Materials, Volume 16, 2002, pp. 281-289.
3. Freidin K.-Erell E., 'Bricks made of slag, cured in the open air', Cement and Concrete Composites, Volume 17, 1995, pp.289-300.
4. Mehta Kumar P., 'Concrete Technology for Sustainable Development' Procc. of International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development, Editor: P.K. Mehta, New Delhi, 1999
5. Moltz H.-Geiseler J., 'Products of steel slags an opportunity to save natural resources' , Waste Management, Volume 21, 2001, pp.285-293
6. Papayianni I.-Anastasiou E., 'Concrete incorporating high volumes of industrial by-products'.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Χ. Τέας, Β. Καλημέρης, Φ. Ριζιώτη, Ε. Χανιωτάκης

ΑΕ Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ, Εργοστάσιο Καμαρίου, 19200 Ελευσίνα, τηλ. 210 -5537963

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η υποκατάσταση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και pet-coke στην παραγωγική διαδικασία τσιμέντου από εναλλακτικά καύσιμα προερχόμενα από μείγματα βιομάζας και διυλιστηριακών υπολειμμάτων και ελαστικών αποτελεί αυξανόμενη πρακτική στην βιομηχανία. Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων βελτιώνει το ενεργειακό ισοζύγιο και συμβάλλει στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου, αφού μειώνεται η χρήση ορυκτών πόρων. Η επίδραση των εναλλακτικών καυσίμων στη παραγωγική διαδικασία σχετίζεται με θέματα ποιότητας τσιμέντου λόγω των συστατικών του καυσίμου αλλά και με θέματα παραγωγικής διαδικασίας λόγω του διαφορετικής συμπεριφοράς στην καύση. Επιπλέον οι περιβαλλοντικοί όροι λειτουργίας των βιομηχανιών εγκαταστάσεων πρέπει να μην επηρεάζονται από την προσθήκη αυτών των υλικών. Τα αποτελέσματα σε εργαστηριακό και βιομηχανικό επίπεδο δείχνουν ότι υποκατάσταση σε επίπεδα κάτω από 10% δεν επηρεάζει τις συνθήκες λειτουργίας και την ποιότητα του προϊόντος ενώ είναι σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνηση για αυξημένες ποσότητες.

Λέξεις κλειδιά: τσιμέντο, εναλλακτικά καύσιμα, λάστιχα

ALTERNATIVE FUELS IN CEMENT PRODUCTION PROCESS

C. Teas, V. Kalimeris, F. Rizioti, E. Haniotakis

TITAN Cement SA, Kamari Plant, 19200 Elefsina, tel. +30-210-5537739

ABSTRACT: The substitution of fossil fuels and pet-coke in cement production process by alternative fuels derived from biomass and oil sludge mixtures and tyres is an increasing practice in industry. The use of secondary fuels improves energy balance and has a positive effect on greenhouse effect as it reduces the use of fossil fuels. The effect of secondary fuels in the manufacturing process is related not only to cement quality due to fuel constituents but also to process parameters due to differences in combustion characteristics. Furthermore, the environmental performance of industrial plants must comply with certain limits when using these materials. Laboratory and industrial scale results show that substitution at levels <10% does not affect operating conditions and product quality. Therefore, the need for further investigation regarding greater substitution levels is apparent.

Keywords: cement, alternative fuels, tyres

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ετησίως το ενεργειακό ισοδύναμο περίπου $25 \cdot 10^6$ τόνων κάρβουνου απαιτείται από τα μέλη του CEMBUREAU για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ενέργειας στην Ευρώπη. Αυτή αποτελεί μία σημαντική χρήση μη ανανεώσιμων πρωτογενών ορυκτών καυσίμων και γι' αυτό το λόγο η βιομηχανία αναζητεί πιο οικονομικούς ενεργειακούς τρόπους παραγωγής τσιμέντου καθώς και εναλλακτικές ενεργειακές μορφές (CEMBUREAU 1997).

Η χρήση εναλλακτικών καυσίμων είναι μία καλά τεκμηριωμένη και οργανωμένη τεχνολογία στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρωπαϊκής τσιμεντοβιομηχανίας για πάνω από 15 έτη. Από το 1995 τουλάχιστον 10% της ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρωπαϊκή τσιμεντοβιομηχανία προσερχόταν από την χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Το ποσοστό αυξάνεται σταδιακά και ποσοστά ανώτερα του 50% είναι εφικτά υπό προϋποθέσεις. Τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί σαν εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία περιλαμβάνουν λάστιχα αυτοκινήτων, πλαστικά, απορρίμματα χαρτιού, χρησιμοποιημένα ορυκτέλαια, πριονίδι και διαλύτες.

Τα στοιχεία που υπάρχουν για την υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων στην Ευρώπη δείχνουν μία αυξανόμενη τάση της χρήσης των εναλλακτικών καυσίμων. Η τάση στην Γερμανική τσιμεντοβιομηχανία παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1. Ποσοστά υποκατάστασης συμβατικών καυσίμων (FLS, 2005)

Έτος	1997	1998	1999	2001
%	15.7	18.8	23.0	30.0
Τύποι εναλλακτικών καυσίμων, 2001				
Υλικό	10^3 t/y		CV, MJ/Kg	
Λάστιχα	234		26	
Ελαιώδη υλικά	128		34	
Υλικά συσκευασίας	418		22	
Πριονίδι	72		14	
Διαλύτες	33		22	
RDF	102		15	
Λευκαντική γαία	29		14	
Ζωικά απορρίμματα	245		17	
Διάφορα	84		12	

ΚΑΥΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η χρήση απορριμμάτων ως εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία έχει πλείστα περιβαλλοντικά οφέλη όπως (Γαλανούλης, 2000):

- Μείωση της χρήσης ορυκτών μη ανανεώσιμων καυσίμων όπως το κάρβουνο καθώς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εξόρυξη και διακίνηση τους.
- Συνεισφορά στη μείωση εκπομπών όπως τα αέρια θερμοκηπίου από την αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων από υλικά που σε αντίθετη περίπτωση θα αποτεφρώνονταν με ανάλογες εκπομπές και υπολείμματα.

- Μειστοποίηση της ανάκτησης ενέργειας από τα απορρίμματα. Το σύνολο της ενέργειας χρησιμοποιείται απευθείας για την παραγωγή κλίνκερ.
- Μειστοποίηση της ανάκτησης των μη καυσίμων των απορριμμάτων και ελάττωση της ανάγκης απόθεσης τυχόν υπολειμμάτων αφού το ανόργανο μέρος παραμένει στο προϊόν.

Η χρήση των απορριμμάτων ως εναλλακτικά καύσιμα είναι τεχνικά εφικτή αφού το οργανικό μέρος καταστρέφεται ενώ το ανόργανο δεσμεύεται και ενώνεται στο παραγόμενο προϊόν. Οι κλίβανοι της τσιμεντοβιομηχανίας έχουν χαρακτηριστικά που τους κάνουν ιδανικές και ασφαλείς εγκαταστάσεις για εναλλακτικά καύσιμα, όπως:

- Υψηλές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία έψησης είναι 1450° C και η θερμοκρασία της φλόγας σχεδόν 2000° C.
- Μεγάλος χρόνος παραμονής
- Οξειδωτική ατμόσφαιρα για πλήρη καύση των οργανικών.
- Αλκαλικό περιβάλλον για τη δέσμευση χλωρίου και θείου.
- Συγκράτηση της τέφρας στο προϊόν.
- Συνεχής και σταθερή λειτουργία και έλεγχος εκπομπών.

Βασικές προϋποθέσεις για την χρήση ενός εναλλακτικού καυσίμου αποτελούν πέραν της ικανοποιητικής θερμογόνου δύναμης και τα ακόλουθα σημεία:

- Να μην υπάρχει αρνητική επίδραση στο περιβάλλον και την υγεία των εργαζομένων.
- Να μην επηρεάζεται αρνητικά η ποιότητα του προϊόντος και η παραγωγική διεργασία.
- Ύπαρξη οικονομικού οφέλους για τον χρήστη.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Προ της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων (ελαστικά αυτοκινήτων και εναλλακτικό στέρεο καύσιμο) η ΑΕ Τσιμεντών ΤΙΤΑΝ είχε προχωρήσει σε βιομηχανικού επιπέδου δοκιμές για την μελέτη της χρήσης τους στην παραγωγική διαδικασία. Έτσι υπάρχουν στοιχεία για την επίδραση των εναλλακτικών καυσίμων στην ποιότητα του παραγόμενου κλίνκερ τόσο με χρήση ελαστικών όσο και με χρήση υγρού εναλλακτικού καυσίμου (Pipilikaki 2005, Συμεωνίδης 2000). Κατά την διάρκεια των ελεγχόμενων δοκιμών πλέον των χαρακτηριστικών του κλίνκερ, έγινε δειγματοληψία αερίων εκπομπών και δειγμάτων από το κύκλωμα. Η υποκατάσταση του καυσίμου έγινε σε ποσοστό ~6% στην περίπτωση των ελαστικών και σε ποσοστά ~10, 20, 30% στην περίπτωση του υγρού εναλλακτικού καυσίμου. Η χρήση των ελαστικών αυτοκινήτων αποτελεί μάλλον την πλέον ελκυστική μορφή εναλλακτικών καυσίμων αφού ακόμα και παλαιότερα δεδομένα δείχνουν ότι στην Ελλάδα υπάρχει ποσότητα περίπου 60.000 τόνων μεταχειρισμένων ελαστικών, ετησίως (Γκίζας, 2000).

Κατά τις δοκιμές με χρήση ελαστικών στο παραγόμενο κλίνκερ προέκυψε ότι η ποιότητα του παραγόμενου κλίνκερ δεν επηρεάστηκε όσον αφορά τις αντοχές (Πίνακας 1). Μόνη επίπτωση υπήρχε στον χρόνο πήξης του τσιμέντου εξ' αιτίας της αύξησης του ποσοστού ολικού Ζη στο κλίνκερ, που είναι μια αναμενόμενη επίδραση (Hewlett, 1988). Εντούτοις το ποσοστό υδατοδιαλυτού Ζη παρέμεινε σταθερό δείχνοντας ότι ενσωματώνεται στο παραγόμενο προϊόν.

Πίνακας 2. Ιδιότητες τσιμέντου

	Blaine	IST, min	FST, min	H ₂ O	1	2	7	28
Χωρίς ελαστικά	3860	115	180	25,6	20	29,5	43	62
Με ελαστικά	3680	170	220	27,4	17,5	30,4	46,7	62,3

Επιπλέον οι μετρήσεις εκπομπών που έγιναν δείχνουν ότι ακόμα και με 30% υποκατάσταση καυσίμου από υγρά εναλλακτικά καύσιμα τηρούνται οι περιβαλλοντικοί όροι του εργοστασίου.

Πίνακας 3. Τεχνικά χαρακτηριστικά γραμμής ελαστικών (Συμεωνίδης, 2000)

Ποσοστό θερμιδικής υποκατάστασης, %	10	20	30	KMP*
Παροχή εναλλακτικού καυσίμου (tn/h)	1.272	2,544	3,817	
Όρια εκπομπής ρύπου(mg/Nm ³)				
KYA 2487/455 FEK 196/8-3-99				
Σκόνη	95	89	85	56
CO	5720	5382	5047	1930
HF	1	1	1	0,030
HCl	10	10	10	0,630
SO ₂	380	360	340	219
Cd + Tl	0,1	0,1	0,1	0,078
Hg	0,1	0,1	0,1	0,015
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V + Sn	1	1	1	0,460

* ενδεικτικές μετρηθείσες τιμές

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Στην συνέχεια όλων των δοκιμών που έγιναν για την αξιολόγηση της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων έγινε η εγκατάσταση των γραμμών τροφοδοσίας ελαστικών και εναλλακτικών καυσίμων. Τα χαρακτηριστικά των δύο γραμμών τροφοδοσίας φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 4. Τεχνικά χαρακτηριστικά γραμμής ελαστικών

Υλικό προς καταστροφή	ελαστικά αυτοκινήτων	
Μέγιστη ωριαία ανάλωση (t/h)	2,5	
Ωριαία ανάλωση στον ΠΚ2 Καμαρίου (t/h)	1,0-1,5	
Μέγιστη ποσότητα αναλίσκόμενων ελαστικών (τεμ/h)	313	
Διαστάσεις ελαστικών	min	max
Διάμετρος (mm)	300	1400
πάχος (mm)	100	400
βάρος (kg)	6	60

Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά γραμμής εναλλακτικών καυσίμων

Υλικό προς καταστροφή	κατάλοιπα δεξαμενών με πριονίδι	
Μέγιστη ωριαία ανάλωση (t/h)	12	
Ελάχιστη ωριαία ανάλωση (t/h)	1,2	
Ωριαία ανάλωση στον ΠΚ1 Καμαρίου (t/h)	1,5-2,5	
Φυσικά χαρακτηριστικά υλικού τροφοδοσίας	min	max
Πυκνότητα (tn/m ³)	0,1	0,5
μέγεθος (mm)	10	50
θερμοκρασία (°C)		40

Επιπλέον καθορίστηκαν οι απαιτήσεις για την προμήθεια του εναλλακτικού καυσίμου που παραλαμβάνει ο Τιτάνας από τον προμηθευτή και παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά εναλλακτικού καυσίμου

Προδιαγραφή	Μονάδα
ΑΘΔ	Cal/g
ΚΘΔ	Cal/g
Υγρασία	%
Πτητικά	%
Τέφρα	%
Αναλογία ιζημάτος / πριονίδι	%
Χλώριο	%
Θείο	%
Αλκάλια	%
Ιχνοστοιχεία	ppm

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Τα εναλλακτικά καύσιμα παρουσιάζουν τις ακόλουθες ιδιότητες που οδηγούν σε αυξημένη θερμидική κατανάλωση και μείωση παραγωγής:

- 1) Αυξημένο ποσοστό υγρασίας
Το αυξημένο ποσοστό υγρασίας αυξάνει την ποσότητα των εκπομπών και την θερμοκρασία τους. Το αποτέλεσμα είναι μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας που απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου.
- 2) Μεγάλο ποσοστό τέφρας
Μεγάλο ποσοστό τέφρας μειώνει την ποσότητα τροφοδοσίας που περνά από την ζώνη προθέρμανσης και ελαττώνει την ανάκτηση θερμότητας. Πάλι δε παρατηρείται αυξημένη θερμοκρασία εκπομπών

3) Μειωμένες ιδιότητες καύσης.

Ορισμένα εναλλακτικά καύσιμα έχουν μέτρια συμπεριφορά κατά την καύση κυρίως λόγω κοκκομετρίας (πχ ολόκληρα ελαστικά στη είσοδο του κλιβάνου). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες εκπομπές CO ή αυξημένα ποσοστά O₂ για την αντιμετώπιση.

4) Μεταβαλλόμενη παροχή εναλλακτικών καυσίμων

Οι μεταβολές στην παροχή μπορεί να προέρχονται από:

- Ανομοιογένεια ιδιοτήτων καύσης (ΘΔ)
- Μεταβολές στην τροφοδοσία λόγω δύσκολων ιδιοτήτων χειρισμού

Τα παραπάνω έχουν το ίδιο αποτέλεσμα με το 3). Πάλι έχουμε αυξημένες εκπομπές CO ή αυξημένα ποσοστά O₂ για την αντιμετώπιση.

5) Είσοδος κρύου αέρα

Τα στερεά εναλλακτικά καύσιμα συνήθως θέλουν μεγαλύτερο ποσοστό αέρα για την πνευματική μεταφορά. Αυτό έχει παρόμοιο αποτέλεσμα όπως η αύξηση του αέρα στο κυρίως μπεκ και απαιτεί επιπλέον ποσοστό καυσίμου.

6) Αύξηση φαινομένων ανακυκλοφορίας

Τα φαινόμενα ανακυκλοφορίας δεν συμβαίνουν μόνο επειδή πτητικά στοιχεία με τάση ανακυκλοφορίας εισάγονται μέσω των εναλλακτικών καυσίμων αλλά και γιατί έχουμε πτωχή καύση (τοπική παραγωγή CO). Η ανακυκλοφορία επιβαρύνει την σταθερή λειτουργία του κλιβάνου, που οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή και αυξημένη κατανάλωση.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την βιομηχανική εμπειρία είναι τα ακόλουθα:

Η βιομηχανική διαδικασία της έψησης κλίνκερ σε περιστροφική καμίνη έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει ελαστικά αυτοκινήτου και άλλα εναλλακτικά καύσιμα με υποκατάσταση των συμβατικών καυσίμων. Αυτό μάλιστα έχει και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα καθώς λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών και των μεγάλων χρόνων παραμονής γίνεται πλήρης καταστροφή με πυρόλυση και οξείδωση των οργανικών ενώσεων που παράγονται κατά την καύση αυτών των υλικών.

Η χρήση ελαστικών αυτοκινήτων και εναλλακτικών καυσίμων ως καύσιμο παράλληλα με το περιβαλλοντικό αποφέρει και οικονομικό όφελος, γιατί τα αυτά τα υλικά μπορούν να αποκτηθούν από τον φορέα συλλογής τους στην Ελλάδα, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που εισάγονται.

Η μέχρι τώρα εμπειρία δείχνει ότι η θερμιδική υποκατάσταση από εναλλακτικά καύσιμα σε επίπεδα <10% είναι εφικτή χωρίς επιπτώσεις στο τελικό προϊόν και στην παραγωγική διαδικασία όπως και στο περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Συμεωνίδης, Κ. 2000. “Καθαρή καύση” οργανικών αποβλήτων στην βιομηχανία, Τσιμεντοβιομηχανία και διαχείριση ειδικών και επικίνδυνων αποβλήτων, σ. 82-85, Τεχνικά Χρονικά, Μάιος – Ιούνιος 2000.
2. Γαλανούλης, Ε. 2000. Εναλλακτικά καύσιμα στην τσιμεντοβιομηχανία, σ. 51-53, Τεχνικά Χρονικά, Μάιος – Ιούνιος 2000.

3. Γκίζας, Κ. 2000. Ο ρόλος της τσιμεντοβιομηχανίας στην διάθεση των χρησιμοποιημένων ελαστικών αυτοκινήτων, σ. 77-81, Τεχνικά Χρονικά, Μάιος – Ιούνιος 2000.
4. Pipilikaki, P. Katsioti, M. Papageorgiou, D. Fragoulis, D. Chaniotakis, E. 2005. Use of tire derived fuel in clinker burning, Cement & concrete composites, 27, pp. 843-847.
5. CEMBUREAU, 1997. Alternative fuels in cement manufacture.
6. FLS, 2005. International Cement Production Seminar.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΑΛΟΥΜΙΝΑΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Ι. Βαγγελάτος, Ι. Ποντίκης, Γ.Ν. Αγγελόπουλος*

*Εργαστήριο Υλικών και Μεταλλουργίας, Τμήμα Χημικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πατρών, 26504,
Ρίο, *angel@chemeng.upatras.gr*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Με στόχο την αξιοποίηση της Σιδηραλουμίνας (ΣΑ) στην υπάρχουσα παραγωγική διαδικασία τσιμέντου τύπου Portland, μελετήθηκαν μίγματα αυτής και Α' υλών. Ο σχεδιασμός των μιγμάτων έγινε με βάση τα όρια που θέτουν οι δείκτες LSF, SM, και AM, βάσει των οποίων σχεδιάζονται τα μίγματα φαρίνας στη βιομηχανία. Οι ορυκτολογικές φάσεις του παραγόμενου κλίνκερ προσδιορίστηκαν με αναλύσεις XRF και εφαρμογή των εξισώσεων του Bogue, ενώ η μικροδομή τους εξετάστηκε με οπτική μικροσκοπία. Στο τελικό προϊόν μετρήθηκαν οι φυσικές ιδιότητες όπως η ειδική επιφάνεια, η απαίτηση σε νερό και ο χρόνος πήξης καθώς και οι αντοχές 2, 7 και 28 ημερών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ΣΑ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας σιδήρου και αλουμινίου στα μίγματα των Α' υλών σε ποσοστά έως και 4%κβ χωρίς επιπτώσεις στις παραπάνω ιδιότητες του τσιμέντου.

Λέξεις κλειδιά: ερυθρά ιλύς, σιδηραλουμίνη, τσιμέντο Portland

ON THE UTILIZATION OF FERROALUMINA IN THE CEMENT PRODUCTION

I. Vangelatos, Y. Pontikes, G. N. Angelopoulos*

*Laboratory of "Materials and Metallurgy", Dept. of Chemical Engineering, University of Patras,
26504, Rio, *angel@chemeng.upatras.gr*

ABSTRACT: Aiming at the utilization of Ferroalumina (FA) in the production of Portland cement, mixtures of FA and raw materials, typical for cement production, were prepared. The mixture design was based on the limitations imposed by the LSF, AM and SM indexes. The mineralogical composition of the produced clinker was calculated by XRF analysis and Bogue's equations. The microstructure was evaluated by optical microscopy. The physical properties of the end product (cement) such as surface area, water requirement, setting time, compressive strength on 2, 7 and 28 days were determined. The results indicate that FA can be used as a carrier of iron and alumina up to 4wt% in the production of OPC without affecting the above mentioned properties.

Keywords: red mud, ferroalumina, OPC production

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ερυθρά ιλύς (ΕΙ) είναι το κύριο παραπροϊόν της διεργασίας Bayer προς παραγωγή αλούμινας. Σήμερα στην Ελλάδα παράγονται 680.000 t/y ΕΙ που απορρίπτονται στον Κορινθιακό κόλπο (www.redmud.org). Η αξιοποίησή της αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας (Singh, 1996) εξαιτίας της πιθανής δημιουργίας προβλημάτων στο περιβάλλον. Το πεδίο στο οποίο εστιάζεται μεγάλο μέρος αυτής της έρευνας, είναι αυτό των δομικών υλικών καθώς η σύσταση της ΕΙ - κυρίως οξείδια του Fe, του Al, του Ca και του Si (www.redmud.org) - είναι παρεμφερής με αυτή των Α' υλών των υλικών αυτών. Παρά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα (Singh, 1996, Rodriguez, 1999), το κύριο μειονέκτημα για την εκτεταμένη χρήση της ΕΙ είναι η υψηλή περιεκτικότητά της σε νερό, που δυσχεραίνει την διακίνηση και την άμεση χρησιμοποίησή της ως Α' ύλη. Με την απομάκρυνση του νερού από την ΕΙ παράγεται το Υπόλειμμα Βωξίτη (ΥΒ) ή Σιδηραλουμίνα (ΣΑ). Το τσιμέντο αποτελεί το κυριότερο δομικό υλικό που παράγεται στην Ελλάδα με παραγωγή άνω των 15 Mt/y (www.hcia.gr) από τις βιομηχανίες «TITAN», «ΗΡΑΚΛΗΣ» και «ΧΑΛΥΨ». Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετήσει την επίδραση της προσθήκης της ΣΑ ως Α' ύλη στην παραγωγική διαδικασία και στις ιδιότητες του παραγόμενου τσιμέντου.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για την παρασκευή των μιγμάτων χρησιμοποιήθηκαν ασβεστόλιθος, φλύσχης και ψαμμίτης ως φορείς ασβεστίου και πυριτίου. Σαν φορέας αλουμινίου και σιδήρου χρησιμοποιήθηκε ΣΑ η οποία προήλθε μετά από επεξεργασία ΕΙ από την «Αλουμίνιον της Ελλάδος» με τη χρήση εργαστηριακής φιλτρόπρεσσας για την απομάκρυνση του νερού. Παρασκευάστηκαν μίγματα με 1%κβ και 4%κβ ΣΑ με κύριο στόχο τη διατήρηση των δεικτών LSF, AM και SM εντός των προβλεπόμενων ορίων. Σαν μίγμα αναφοράς χρησιμοποιήθηκε φαρίνα από το εργοστάσιο «TITAN». Η χημική σύσταση των μιγμάτων προσδιορίστηκε με XRF και δίδεται παρακάτω, Πίνακας 1.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση φαρίνων.

%κβ	Φαρίνα		
	0%κβ ΣΑ	1%κβ ΣΑ	4%κβ ΣΑ
SiO ₂	13,68	13,28	14,55
Al ₂ O ₃	3,28	4,76	4,36
Fe ₂ O ₃	2,06	2,22	3,23
CaO	42,84	43,41	46,65
MgO	0,69	0,65	0,45
K ₂ O	0,56	0,52	0,20
Na ₂ O	0,17	0,20	0,20
LSF	98,5	97,93	97,03
AM	1,59	2,14	1,35
SM	2,56	1,90	1,92

Με προσθήκη νερού τα μίγματα τροποποιήθηκαν σε σφαιρίδια διαμέτρου < 30mm. Ακολούθησε προέψηση στους 1000⁰C προκειμένου να απομακρυνθούν το CO₂, το οργανικό φορτίο καθώς και το χημικά δεσμευμένο νερό. Στη συνέχεια έγινε έψηση στους 1450⁰C για 40 min σε κατάλληλα διαμορφωμένο σπινελικό χωνευτήριο. Στο παραγόμενο κλίνκερ έγινε χημική ανάλυση με XRF. Τα ποσοστά ελευθέρως ασβέστου μετρήθηκαν με τη μέθοδο της αιθυλενογλυκόλης (ASTM C 114-03) ενώ τα ποσοστά των ορυκτολογικών φάσεων υπολογίστηκαν με βάση την ανάλυση XRF, Πίνακας 2, από τις εξισώσεις του Bogue. Η μικροδομή του κλίνκερ προσδιορίστηκε με οπτική μικροσκοπία.

Το παραγόμενο κλίνκερ συναλέστηκε με γύψο προκειμένου να παραχθεί τσιμέντο τύπου CEM I. Η ειδική επιφάνεια των παραγόμενων τσιμέντων (Blaine) μετρήθηκε σύμφωνα με το EN 196-6, ενώ ο χρόνος πήξης και η απαίτηση σε νερό σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-3. Οι αντοχές 2, 7 και 28 ημερών προσδιορίστηκαν με βάση το πρότυπο EN 196 – 1.

Πίνακας 2. Χημική σύσταση κλίνκερ.

%κβ	Κλίνκερ		
	0%κβ ΣΑ	1%κβ ΣΑ	4%κβ ΣΑ
SiO ₂	21.80	21.41	21.34
Al ₂ O ₃	5.41	5.99	5.65
Fe ₂ O ₃	2.84	2.96	4.15
CaO	67.22	67.62	67.22
MgO	1.32	1.44	1.09
K ₂ O	0.57	0.27	0.38
Na ₂ O	0.42	0.45	0.43
SO ₃	0.02	BDL*	BDL*

* Κάτω από τα όρια ανίχνευσης

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Χαρακτηρισμός κλίνκερ

Η ορυκτολογική σύσταση των παραγόμενων κλίνκερ, όπως υπολογίστηκε από τις εξισώσεις του Bogue, παρατίθεται στον Πίνακα 3. Για όλα τα κλίνκερ παρατηρούμε το σχηματισμό ενός ιδιαίτερα μεγάλου ποσοστού πυριτικού τριασβεστίου > 60% και ενός χαμηλότερου ποσοστού πυριτικού διασβεστίου, απόρροια της γρήγορης ψύξης τους. Το κλίνκερ αναφοράς (0%κβ ΣΑ), παρουσιάζει υψηλότερο ποσοστό ελευθέρως ασβέστου σε σχέση με τα κλίνκερ με 1%κβ και 4%κβ ΣΑ όπου το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο από 1%κβ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η φαρίνα αναφοράς είναι πιο χονδρόκοκη από τις φαρίνες με ΣΑ, Πίνακας 4, με αποτέλεσμα την δυσκολότερη έψησή της στον ίδιο χρόνο.

Πίνακας 3. Ορυκτολογικές φάσεις στα παραγόμενα κλίνκερ.

	Κλίνκερ		
	0%κβ ΣΑ	1%κβ ΣΑ	4%κβ ΣΑ
% C ₃ S*	67.51	68.07	67.57
% β - C ₂ S*	11.57	10.04	10.20
% C ₃ A*	9.53	10.87	7.97
% C ₄ AF*	8.65	9.00	12.62
% CaO _f **	4.90	0.59	0.90

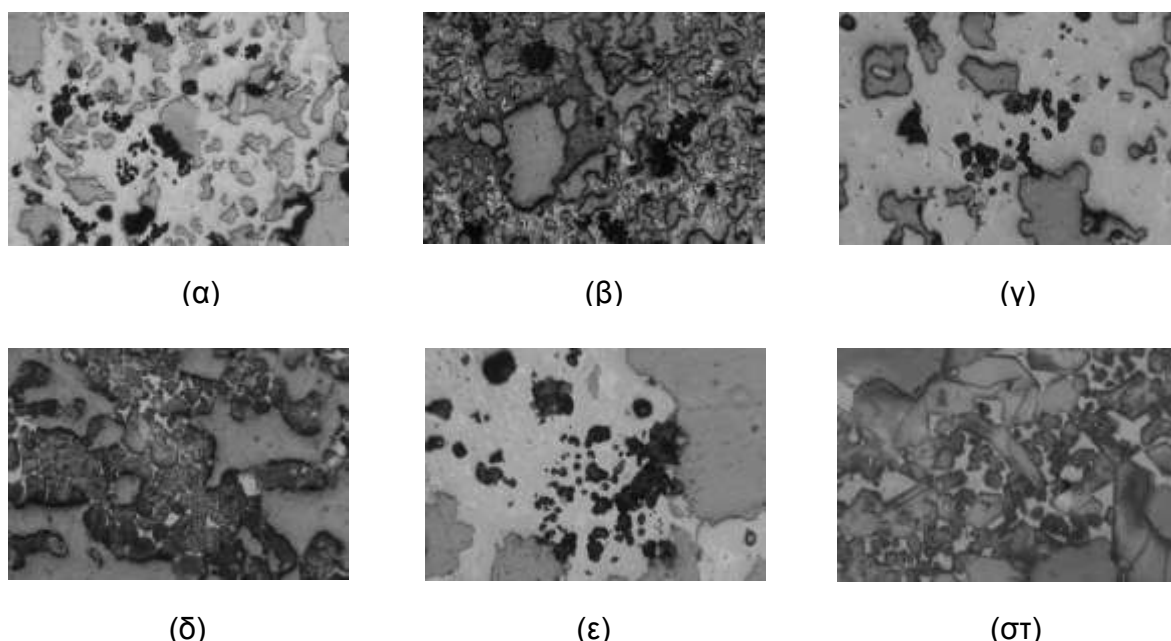
* υπολογισμός από τις σχέσεις του Bogue

** από μέτρηση με βάση το ASTM C 114-03

Πίνακας 4. Λεπτότητα φαρίνων.

Συγκρατούμενο κοκκομετρικό κλάσμα	Φαρίνα		
	0%κβ ΣΑ	1%κβ ΣΑ	4%κβ ΣΑ
+ 90 μm	18.0%	0.0%	0.0%
+ 45 μm	36.8%	18.0%	19.8%

Για το κλίνκερ αναφοράς η παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο έδειξε ένα μεγάλο ποσοστό κρυστάλλων ελευθέρως ασβέστου σε μορφή συστοιχιών (clusters), Εικόνα 1(α). Αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι πυριτικού τριασβεστίου σε διάφορα μεγέθη είναι εμφανείς, ενώ διάσπαρτοι βρίσκονται αρκετοί μικροί κρύσταλλοι πυριτικού διασβεστίου. Εμφανές είναι και το μικρό ποσοστό της υγρής φάσης, χαρακτηριστικό του χαμηλού δείκτη εησιμότητας της φαρίνας αναφοράς, Εικόνα 1(β). Για το κλίνκερ 1%κβ ΣΑ παρατηρούμε χαμηλό ποσοστό σε ελευθέρω ασβεστο υπό μορφή μεμονωμένων κρυστάλλων, Εικόνα 1(γ), αλλοτριόμορφους κρυστάλλους πυριτικού τριασβεστίου και σφαιρικούς κρυστάλλους πυριτικού διασβεστίου. Η υγρή φάση είναι λεπτοκρυσταλλική και καλά σχηματισμένη, Εικόνα 1(δ). Στο κλίνκερ 4%κβ ΣΑ η ελευθέρω ασβεστος εμφανίζεται με τη μορφή μεμονωμένων κρυστάλλων και μικρών clusters, Εικόνα 1(ε). Οι κρύσταλλοι του πυριτικού τριασβεστίου παρουσιάζονται σε διάφορα μεγέθη, γωνιώδους μορφής ενώ παρατηρούμε και λίγους σφαιρικούς κρυστάλλους πυριτικού διασβεστίου. Η υγρή φάση είναι εκτεταμένη και καλά σχηματισμένη, Εικόνα 1(στ).



Εικόνα 1. Μικροδομή παραγόμενων κλίνκερ (α) clusters CaO_f (x 100), (β) Αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι C_3S , μικροί κρύσταλλοι C_2S , ελάχιστη υγρή φάση (x 100), (γ) λίγοι μεμονωμένοι κρύσταλλοι CaO_f (x 200), (δ) Αλλοτριόμορφοι κρύσταλλοι C_3S , κρύσταλλοι C_2S , καλά σχηματισμένη υγρή φάση (x 200), (ε) μεμονωμένοι κρύσταλλοι και μικρά clusters CaO_f (x 200), (στ) Γωνιώδεις κρύσταλλοι C_3S , λίγοι κρύσταλλοι C_2S , καλά σχηματισμένη υγρή φάση (x 500).

Χαρακτηρισμός τσιμέντων

Τα παραπάνω κλίνκερ συναλέστηκαν με 5%κβ CaSO_4 για 5h προκειμένου να παραχθεί τσιμέντο τύπου Portland CEM I. Η ειδική επιφάνεια (Blaine) των παραγόμενων τσιμέντων παρατίθεται στον Πίνακα 5, μαζί με την απαίτηση σε νερό και το χρόνο πήξης. Τα αποτελέσματα είναι μέσα στα όρια που θέτουν οι Ευρωπαϊκοί κανονισμοί για το τσιμέντο τύπου Portland (Bhatty, 2004).

Πίνακας 5. Φυσικές ιδιότητες παραγόμενων τσιμέντων.

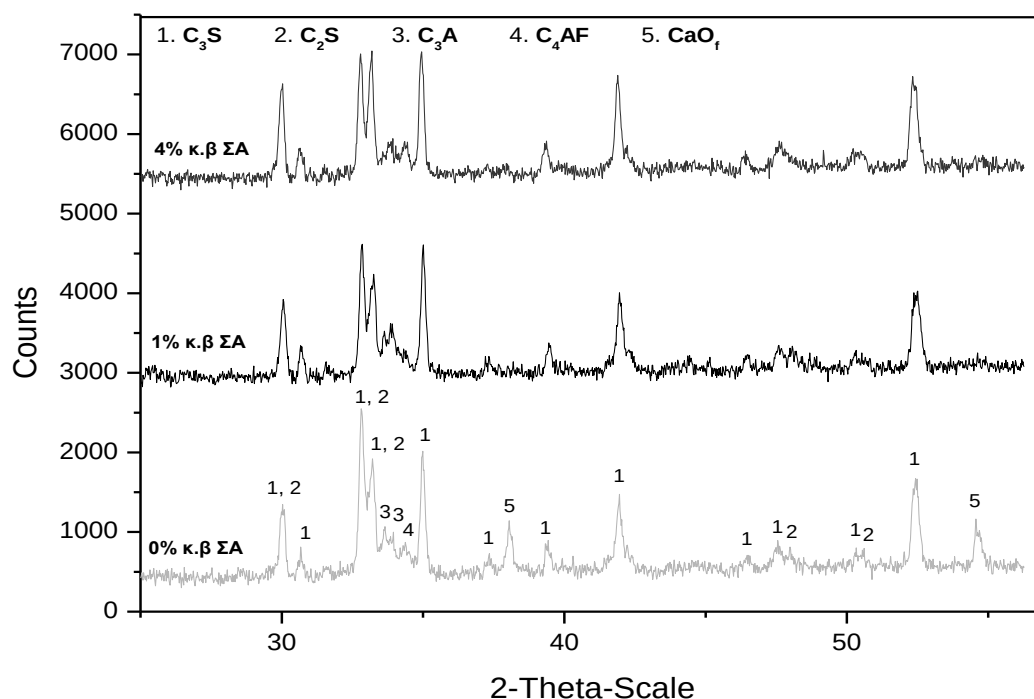
	Τσιμέντο		
	0%κβ ΣΑ	1%κβ ΣΑ	4%κβ ΣΑ
Ειδική επιφάνεια (cm ² /g)	2950	3150	3150
Έναρξη πήξης (min)	100	100	160
Τέλος πήξης (min)	160	170	240
Απαίτηση σε νερό (%)	25.0	25.2	25.6

Οι αντοχές 2, 7 και 28 ημερών, Πίνακας 6, δείχνουν ότι τα δείγματα τσιμέντου με ΣΑ εμφανίζουν μεγαλύτερες πρώιμες αντοχές από το δείγμα αναφοράς λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού περιεχόμενου σιδηραργλικού τετρασβεστίου και αργλικού τριασβεστίου που αποτελούν τους κύριους φορείς ανάπτυξης των πρώιμων αντοχών (Lea, 1998).

Πίνακας 6. Αντοχές παραγόμενων τσιμέντων.

Αντοχές (Mpa)	Τσιμέντο		
	0%κβ ΣΑ	1%κβ ΣΑ	4%κβ ΣΑ
2 Ημέρες	15.9	17.1	21.0
7 Ημέρες	34.1	37.4	37.0
28 Ημέρες	54.2	60.3	54.7

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται τα ακτινογράμματα των 3 παραγόμενων τσιμέντων. Χαρακτηριστικές κορυφές που αποδίδονται και στις 4 κύριες ορυκτολογικές φάσεις του τσιμέντου Portland είναι εμφανείς. Στο δείγμα με 0%κβ ΣΑ, διακρίνονται πιο έντονα οι κορυφές της ελευθέρως ασβέστου στις γωνίες 37.4⁰ και 54.0⁰ (Bhatty, 2004) απόρροια του χαμηλού δείκτη εησιμότητας.



Εικόνα 2. Ακτινογράμματα τσιμέντων εργαστηριακών δοκιμών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσθήκη της ΣΑ στο μίγμα των Α' υλών σε ποσοστό έως και 4%κβ στην υφισταμένη διεργασία παραγωγής τσιμέντου τύπου Portland είναι δυνατή. Η εισαγωγή της ΣΑ στην παραγωγική διαδικασία προσφέρει εξοικονόμηση ενέργειας κατά την άλεση των Α' υλών εξαιτίας της λεπτότητάς της (90% των κόκκων < 75μm). Ακόμα με αύξηση του ποσοστού προσθήκης, η φαρίνα γίνεται πιο εύψιστη λόγω της μείωσης του πυριτικού (SM) και του αργιλικού (AM) δείκτη. Όσον αφορά το παραγόμενο προϊόν, αυτό δεν παρουσιάζει αποκλίσεις από το τσιμέντο Portland, τόσο στις βασικές φυσικές ιδιότητές του όσο και στο σχηματισμό των κύριων ορυκτολογικών φάσεων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή υποστηρίζεται από το πρόγραμμα ΕΠΑΝ 12252/19-11-02 της ΓΓΕΤ.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Bhatt J. I., Miller F. M., Kosmatka S. H., 2004. Innovations in Portland Cement Manufacturing, Portland Cement Association.
2. Lea's chemistry of cement and concrete, 1998, fourth edition, edited by Peter C. Hewlett, 286.
3. Rodriguez, G. A. Perez; Rivera, F. Guitian; De Aza Pendas, S. 1999. Manufacture of ceramic materials from Bayer process red muds. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 38(3), 220-26.
4. Singh M., Upadhyay S.N., Prasad P.M., 1996. Preparation of special cements from red mud, Waste management, vol. 16, no. 8, 665 – 70.

<http://www.redmud.org>

<http://www.hcia.gr>

ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Κ. Κ. Σίδερης, Δ. Βίτσα, Ι. Παυλοπούλου, Ν. Τσιλιακούδης

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Βασ. Σοφίας 12, 67 100, Ξάνθη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης βιομηχανικών παραπροϊόντων στην παρασκευή σκυροδέματος. Παρασκευάστηκαν σκυροδέματα με ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης (ΙΤΜ), ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (ΙΤΠ), κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας (ΚΤΠ) και φαρίνα ηλεκτροφίλων (ΦΗΦ). Οι ιδιότητες που μετρήθηκαν ήταν η επίδραση των παραπροϊόντων στην κάθιση και στη διατήρηση της κάθισης του μείγματος, η επίδραση στον αρχικό χρόνο πήξης των σκυροδεμάτων καθώς και η επίδραση στη θλιπτική αντοχή σε διάφορες ηλικίες. Παράλληλα μετρήθηκαν και τα βάθη ενανθράκωσης όλων των σκυροδεμάτων μετά από έκθεσή τους σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, η χρήση όλων των παραπροϊόντων στο εξετασθέν ποσοστό (20% σε αντικατάσταση της άμμου) οδήγησε σε αύξηση της αντοχής στις 28 ημέρες. Όμως, μόνο τα μείγματα με ΦΗΦ και ΙΤΜ παρουσίασαν την ίδια σχεδόν κάθιση με το μείγμα αναφοράς. Αντίθετα, στις άλλες δύο περιπτώσεις η επίδραση της τέφρας Πτολεμαΐδας στην κάθιση των μειγμάτων ήταν έντονα αρνητική, ενώ η προσθήκη τους οδήγησε σε μείωση του αρχικού χρόνου πήξης των σκυροδεμάτων.

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, φαρίνα ηλεκτροφίλων, εργασιμότητα, θλιπτική αντοχή, ενανθράκωση.

USE OF INDUSTRIAL BY-PRODUCTS IN CONCRETE

K.K. Sideris, D. Vitsa, I. Paulopoulou and N. Tsiliakoudis

Lab. of Building Materials, Department of Civil Engineers, DUTH, 12 Vas. Sophias str, 671 00 Xanthi.

ABSTRACT: In this reasearch the use of industrial by-products in concrete is experimentally investigated. The materials tested were three fly ashes of lignite origin and cement kiln dust. The concrete properties measured were the slump and slump retention, the initial setting time as well as the compressive strength and carbonation resistance of concrete mixtures. All tested materials were added in the mixture at a 20% per weight of cement dosage by replacing the aggregates. The compressive strength at the age of 28 days was increased for all mixtures. Addition of Ptolemaida's fly ash significantly reduced the intial slump of concrete mixtures as well as the initial setting time.

Keywords: lignite fly ash, cement kiln dust, workability, compressive strength, carbonation.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα έχει ως υλικό τύχει ευρύτατης διάδοσης στο χώρο των κατασκευών λόγω της εύκολης μεταφοράς του και της ιδιότητάς του να αναπτύσσει σε μικρό χρονικό διάστημα υψηλές αντοχές. Σε αντίθεση όμως με όλα τα άλλα οικοδομικά υλικά, χαρακτηρίζεται από μία μοναδική ιδιαιτερότητα: η ποιότητα του υλικού που παραγγέλλεται και έρχεται στην κατασκευή, δεν εξασφαλίζει και την ποιότητα του τοποθετημένου στην κατασκευή υλικού. Η εξήγηση αυτής της ιδιαιτερότητας είναι το γεγονός ότι ανάμεσα στο όχημα μεταφοράς και στην οικοδομή παρεμβάλλονται η διάστρωση, η συμπύκνωση και η συντήρηση του σκυροδέματος, εργασίες απαραίτητες προκειμένου το υλικό να αναπτύξει τη σωστή δομή που θα του επιτρέψει την εξέλιξη των ιδιοτήτων του στο βέλτιστο βαθμό. Προκειμένου η διάστρωση και η συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος να πραγματοποιηθούν με τον πλέον σωστό τρόπο, απαιτείται ένα σκυρόδεμα με υψηλό βαθμό εργασιμότητας, δηλαδή υψηλή τιμή κάθισης την οποία να μπορεί να διατηρεί για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Σκυροδέματα με χαμηλή κάθιση ή γρήγορη απώλειά της μετά την προσθήκη υπερρευστοποιητή δημιουργούν προβλήματα τόσο στη διάστρωση όσο και στη συμπύκνωσή τους, με συνέπεια τη δημιουργία εσωτερικών κενών (φωλιές) στα δομικά στοιχεία σκυροδέματος. Αποτέλεσμα της ελλιπούς συμπύκνωσης του σκυροδέματος είναι λοιπόν η αύξηση του πορώδους του στο έργο, γεγονός που μειώνει την ανθεκτικότητα των κατασκευών αλλά και την πραγματική αντοχή των στοιχείων του έργου. Στην παρούσα εργασία μελετάται πειραματικά η δυνατότητα προσθήκης βιομηχανικών παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα μελετάται η επίπτωση της προσθήκης τους τόσο στην εξέλιξη των μηχανικών αντοχών, όσο και στη μεταβολή της κάθισης των νωπών μειγμάτων.

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.

Παρασκευάστηκαν τέσσερα μείγματα σκυροδέματος με χρήση διαφορετικών βιομηχανικών παραπροϊόντων: της ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης (ITM), της ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαίδας (ITΠ), της κατεργασμένης τέφρας Πτολεμαίδας (KTΠ) και της φαρίνας ηλεκτροφίλτρων (ΦΗΦ). Η χημική ανάλυση των υλικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Όλα τα υλικά προστέθηκαν στο μείγμα αντικαθιστώντας την άμμο σε ποσοστό 20% του βάρους του τσιμέντου. Οι αναλογίες μείξεως των παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων καθώς και οι μετρήσεις της αρχικής τιμής της κάθισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1: Χημική ανάλυση ιπταμένων τεφρών και φαρίνας ηλεκτροφίλτρων.

Οξείδια (%)	ΦΗΦ	ITM	ITΠ	KTΠ
SiO ₂	13,68	47.08	27,10	45.15
Ενεργό SiO ₂	--	15.69	-	22.58
Al ₂ O ₃	4,36	18.62	11,22	17.50
Fe ₂ O ₃	2,30	6.72	4,14	8.18
CaO	42,59	17.50	38,43	14.87
Ενεργό CaO	--	--	12,34	1.64
MgO	1,23	3.81	3,46	3.44
SO ₃	0,10	3.28	6,31	4.72
Na ₂ O	0,28	0.68	0,81	--
K ₂ O	0,79	1.52	0,54	--
Διερχόμενα από το κόσκινο 45 μm	---	65.5	16	25.5

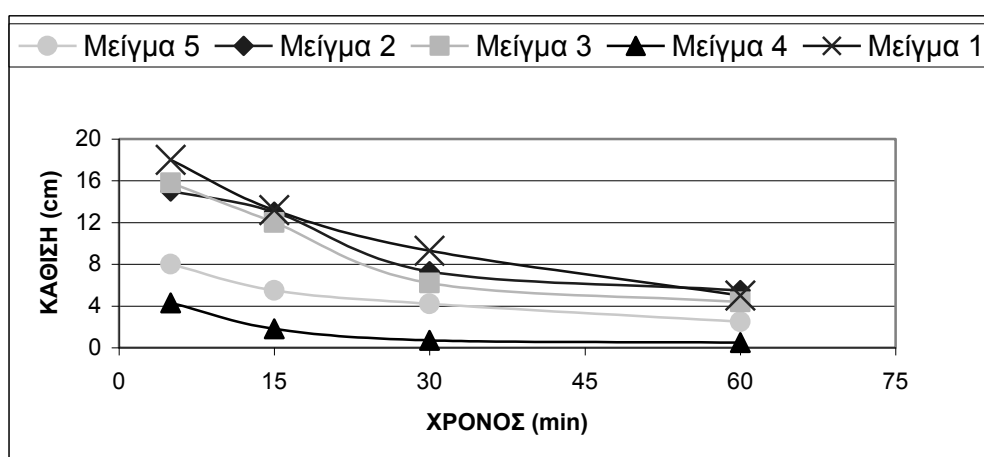
Πίνακας 2. Αναλογίες μείξεως παρασκευασθέντων σκυροδεμάτων.

Αναλογίες μείξεως (Kg/m ³)	Μείγμα 1	Μείγμα 2	Μείγμα 3	Μείγμα 4	Μείγμα 5
CEM ΠΑ/Μ 42.5N	330	330	330	330	330
Άμμος (ασβεστολιθική)	980	914	914	914	914
Γαρμπίλι	150	150	150	150	150
Χαλίκι	750	750	750	750	750
ΦΗΦ	---	66	---	---	---
ITM	---	---	66	---	---
ITΠ	---	---	---	66	---
ΚΤΠ	---	---	---	---	66
Νερό	210	210	210	210	210
Υπερ/της (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Κάθιση (cm)	18	15	16	4	8

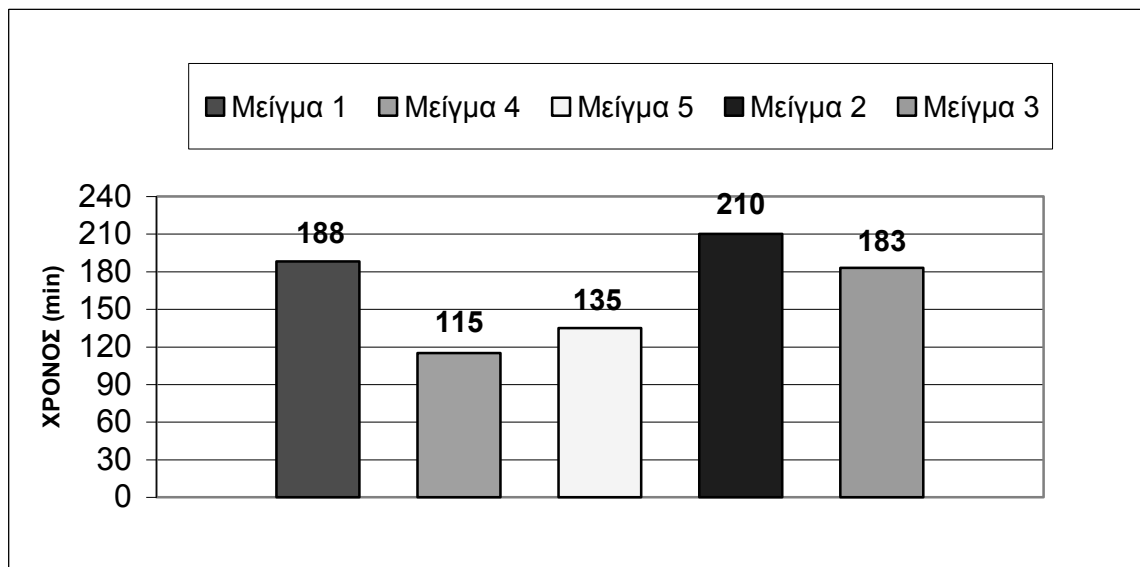
Η τιμή της κάθισης μετρούταν για μία ώρα μετά την παρασκευή των μειγμάτων, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των υλικών στη διατήρηση του εργασίμου των μειγμάτων. Η μεταβολή της κάθισης παρουσιάζεται για όλα τα μείγματα στο Σχήμα 1.

Η προσθήκη φαρίνας ηλεκτροφίλτρων καθώς και ιπτάμενης τέφρας Μεγαλόπολης δεν επηρέασε ουσιαστικά τη μεταβολή της κάθισης των μειγμάτων 2 και 3, παρά το γεγονός ότι μείωσε ελαφρώς την αρχική τιμή της σε σχέση με το μείγμα αναφοράς. Η μείωση όμως τόσο της αρχικής κάθισης όσο και της μεταβολής της σε χρονικό διάστημα μίας ώρας ήταν μεγάλη για τα μείγματα 4 και 5. Ιδιαίτερα το μείγμα 4, στην παρασκευή του οποίου χρησιμοποιήθηκε ακατέργαστη τέφρα Πτολεμαΐδας, παρουσίασε αρχική κάθιση ίση με το 20% αυτής του μείγματος αναφοράς, ενώ και αυτή μηδενίστηκε σε διάστημα 30 λεπτών της ώρας.

Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα της επίδρασης των παραπροϊόντων στον αρχικό χρόνο πήξης των σκυροδεμάτων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 1. Μεταβολή της κάθισης σε σχέση με το χρόνο.



Σχήμα 2: Αρχικός χρόνος πήξης παρασκευασθέντων μειγμάτων.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.

Σε όλα τα μείγματα μετρήθηκε η θλιπτική αντοχή σε διάφορες ηλικίες κατά EN196-1. Η μέτρηση της θλιπτικής αντοχής πραγματοποιήθηκε σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος 150x150x150 mm ενώ η τιμή κάθε ηλικίας αποτελεί το μέσο όρο τριών μετρήσεων. Οι μετρήσεις των θλιπτικών αντοχών παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στον Πίνακα 3.

Παράλληλα παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 60x100 mm. Τα δοκίμια αυτά, αφού συντηρήθηκαν όπως ορίζει ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97) για διαφορετικές ηλικίες, τοποθετήθηκαν σε θάλαμο επιταχυνόμενης ενανθράκωσης, με συγκέντρωση CO₂ = 10%, σχετική υγρασία 70% και θερμοκρασία 20±2 °C. Μετά από παραμονή έξι εβδομάδων στον ανωτέρω θάλαμο τα δοκίμια θραύστηκαν και ψεκάστηκαν με διάλυμα φαινολοφθαλείνης, προκειμένου να μετρηθεί το βάθος ενανθράκωσης (RILEM, 1988). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για όλα τα μείγματα στον Πίνακα 4.

Πίνακας 3: Θλιπτική αντοχή σκυροδεμάτων σε διαφορετικές ηλικίες.

	Θλιπτική αντοχή (MPa)				
	Μείγμα 1	Μείγμα 2	Μείγμα 3	Μείγμα 4	Μείγμα 5
2 ημέρες	13,24	17,96	15,19	17,62	16,86
28 ημέρες	28,67	31,79	30,21	36,76	39,66
60 ημέρες	32,01	34,13	33,44	42,15	42,16

Η θλιπτική αντοχή των μειγμάτων στην παρασκευή των οποίων χρησιμοποιήθηκε ιπτάμενη τέφρα (μείγματα 3, 4 και 5) παρουσιάστηκε αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη του μείγματος αναφοράς σε όλες τις μετρηθείσες ηλικίες. Από τις τέφρες που χρησιμοποιήθηκαν στην αύξηση της αντοχής περισσότερο συνεισέφερε η κατεργασμένη τέφρα Πτολεμαΐδας, λόγω της μεγαλύτερης λεπτότητας και της μεγαλύτερης περιεκτικότητάς της σε ενεργό πυρίτιο. Το μείγμα 3 που παρασκευάστηκε με ιπταμένη τέφρα Μεγαλόπολης παρουσίασε πολύ μικρή αύξηση αντοχών

σε κάθε ηλικία σε σχέση με το μείγμα αναφοράς. Αντίστοιχα το μείγμα 4 (ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας) ανέπτυξε αντοχές ελαφρά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του μείγματος 5 (κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας) στις ηλικίες των 28 και 60 ημερών. Ανάλογα αποτελέσματα όσον αφορά την επίδραση των τεφρών στην αύξηση των αντοχών των μειγμάτων αναφέρονται και σε άλλες εργασίες (Sideris et al, 2005).

Πίνακας 4: Βάθος ενανθράκωσης σκυροδεμάτων για διαφορετικό χρόνο συντήρησης.

Βάθος ενανθράκωσης (mm)					
	Μείγμα 1	Μείγμα 2	Μείγμα 3	Μείγμα 4	Μείγμα 5
1 ημ.	30	30	30	27	30
3 ημ.	20	10	17	18	19
7 ημ.	7	5	9	5	9

Αυξημένες αντοχές σε σχέση με το μείγμα αναφοράς ανέπτυξε και το σκυρόδεμα που παρασκευάστηκε με προσθήκη φαρίνας ηλεκτροφίλτρων (μείγμα 2). Τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με όσα αναφέρονται στην εργασία των Σίδερης κα, 2005. Στην εργασία αυτή παρασκευάστηκε μείγμα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με προσθήκη φαρίνας ηλεκτροφίλτρων, τα δοκίμια του οποίου παρουσίασαν αξιοσημείωτη μείωση της θλιπτικής αντοχής σε όλες τις ηλικίες. Στο μείγμα εκείνο είχε προστεθεί ποσότητα ΦΗΦ ίση με το 58% του βάρους του τσιμέντου, αναλογία σχεδόν τριπλάσια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Η επίδραση της φαρίνας ηλεκτροφίλτρων στις μηχανικές και άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος βρίσκεται υπό μελέτη.

Αναφορικά με το βάθος ενανθράκωσης, η προσθήκη φαρίνας ηλεκτροφίλτρων ή ιπτάμενης τέφρας είχε σε κάθε περίπτωση ευνοϊκά αποτελέσματα. Τα δοκίμια των μειγμάτων 2, 3, 4 και 5 που είχαν υποστεί υγρή συντήρηση τριών ή επτά ημερών πριν την εισαγωγή τους στο θάλαμο ενανθράκωσης, παρουσίασαν μειωμένο βάθος ενανθράκωσης σε σχέση με το μείγμα αναφοράς. Τα δοκίμια όλων των μειγμάτων με συντήρηση 1 ημέρας είχαν ενανθρακωθεί πλήρως.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προσθήκη βιομηχανικών παραπροϊόντων στο σκυρόδεμα μεταβάλλει τις ιδιότητες τόσο του νωπού, όσο και του σκληρυμένου μείγματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, όλα τα υλικά που εξετάστηκαν οδήγησαν σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής των σκυροδεμάτων στα οποία προστέθηκαν. Η αύξηση της αντοχής υπήρξε μεγαλύτερη στα μείγματα με ιπτάμενη τέφρα Πτολεμαΐδας –κατεργασμένη και ακατέργαστη- και μικρότερη στα μείγματα με ΦΗΦ και ιπτάμενη τέφρα Μεγαλόπολης. Επίσης ευνοϊκή υπήρξε η επίδραση όλων των υλικών στη μείωση του βάθους ενανθράκωσης όλων των δοκιμίων που υπέστησαν υγρή συντήρηση 3 ή 7 ημερών.

Όσον αφορά την επίδραση των παραπροϊόντων στις ιδιότητες των νωπών μειγμάτων, αυτή μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: στα υλικά τα οποία δεν επέφεραν αξιοσημείωτες αλλαγές στην κάθιση, τη διατήρηση της κάθισης και τον αρχικό χρόνο πήξης των μειγμάτων, και σε αυτά που οδηγούν σε σημαντική μείωση των ανωτέρω ιδιοτήτων. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν η φαρίνα ηλεκτροφίλτρων και η τέφρα Μεγαλόπολης και στη δεύτερη οι δύο τέφρες Πτολεμαΐδας με την ακατέργαστη να παρουσιάζει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

RILEM TC 56, 1988. Measurement of hardened concrete carbonation depth CPC 18, *Materials and Structures*, Vol 21, (126), pp.453-455.

Sideris K.K., Savva A. Papayianni I. 2005. Sulfate Resistance and Carbonation of plain and blended cements, *Cement and Concrete Composites*, (in press).

Σίδερης Κ.Κ., Γκυζάς Κ., Διχάλα Ε., Κοτσάνης Π. και Στρατηγόπουλος Β., 2005 Χρήση Βιομηχανικών Παραπροϊόντων για την Παρασκευή Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος, *Πρακτικά 1^{ου} Ελληνικού Συνεδρίου για την αξιοποίηση των βιομηχανικών παραπροϊόντων στις κατασκευές*, Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2005.

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΘΕΙΚΩΝ ΣΕ ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΥΝ ΟΡΥΚΤΕΣ ΚΑΙ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ Α΄ ΥΛΕΣ

Δ. Τσαματσούλης

*Δρ. Χημικός Μηχανικός, Συντονιστής Ποιότητας της ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε., 17^ο Χλμ.
Εθνικής Οδού Αθηνών-Κορίνθου, 19300, Ασπρόπυργος Αττικής*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στόχος της μελέτης είναι η βελτιστοποίηση του ποσοστού των θεικών που περιέχονται σε τσιμέντα παραγόμενα σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1. Η βελτιστοποίηση αφορά τις αντοχές του τσιμέντου σε ηλικία 28 ημερών. Ως πρώτες ύλες για την παραγωγή τους χρησιμοποιήθηκαν, εκτός του κλίνκερ και των ορυκτών – γύψος, ποζολάνη, ασβεστόλιθος – και εναλλακτικές όπως γύψος από αποθείωση (FGD) και ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα. Για όλες τις συνθέσεις που μελετήθηκαν παρέχεται γενικευμένο διάγραμμα, οι αντίστοιχες εξισώσεις καθώς και ανάλυση διασποράς, εργαλεία τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για σχεδιασμό και βελτιστοποίηση της σύνθεσης τσιμέντου καθώς και για αποτελεσματικότερη χρήση των εναλλακτικών α΄ υλών.

Λέξεις κλειδιά: βελτιστοποίηση, τσιμέντο, θειικά, συσχέτιση, διασπορά

OPTIMIZATION OF SULPHATES CONTENT OF CEMENTS CONTAINING MINERAL AND ALTERNATIVE RAW MATERIALS

D. Tsamatsoulis

Chemical Engineer, PhD, Quality Coordinator of the Halyps Building Materials SA., 17th km.Nat.Rd. Athens-Korinth, 193 00 Aspropyrgos, Attica

ABSTRACT: The aim of this study is to optimise the percentage of sulphate contained in cement produced according to the norm ELOT EN 197-1. The optimisation refers to the cement 28-days compressive strength. Except clinker and mineral compounds (gypsum, pozolane, limestone), other alternative raw materials (as FGD, calcareous fly ash), were also utilized. For all the compositions studied, a generalized figure, as well as the corresponding equations and variance analysis, have been provided. These tools could be useful for the design and optimization of the cement composition as well as for the effective utilization of alternative raw materials.

Keywords: optimization, cement, sulphates, correlation, variance

ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Αντικείμενο της μελέτης είναι η βελτιστοποίηση των θεικών που περιέχονται σε τσιμέντα παραγόμενα σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 (2000). Η βελτιστοποίηση αφορά τις αντοχές του τσιμέντων σε ηλικία 28 ημερών. Πέραν του κλίνκερ, ως πρώτες ύλες για την παραγωγή τους χρησιμοποιήθηκαν εκτός των ορυκτών – γύψος, ποζολάνη, ασβεστόλιθος – και εναλλακτικές όπως γύψος προερχόμενη από μονάδα αποθείωσης (FGD) εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής και ασβεστόχα ιπτάμενη τέφρα. Το περιεχόμενο SO_3 της FGD ήταν παραπλήσιο με αυτό της ορυκτής γύψου – 43% - ενώ της ιπτάμενης τέφρας ήταν 3.1 %.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν με τσιμέντα που παρασκευάστηκαν εργαστηριακά, των οποίων οι συνθέσεις ήταν παραπλήσιες με τα βιομηχανικά παραγόμενα. Στόχος της μελέτης είναι να συγκριθεί η βέλτιστη τιμή θεικών που αντιστοιχεί στην χρήση εναλλακτικών α! υλών με αυτή που προκύπτει από την χρήση ορυκτών υλικών.

Η εκτίμηση της βέλτιστης τιμής θεικών καθώς και η ανάλυση της ευαισθησίας της, έχει άμεσο πρακτικό χαρακτήρα και αποτέλεσμα στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής, διότι με βάση αυτή μπορούν να σχεδιαστούν ή και να επανασχεδιαστούν οι οδηγίες ρύθμισης της γύψου που τροφοδοτείται στους μύλους τσιμέντου

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Όλες οι πρώτες ύλες αλέστηκαν ξεχωριστά σε εργαστηριακό μύλο έτσι ώστε να διέρχονται 100% από το κόσκινο των 90 μ . Ειδικά το κλίνκερ αλέστηκε σε ειδική επιφάνεια Blaine 3400-3600 cm^2/gr και λεπτότητα R40, 16%-22%. Στη συνέχεια αναμίχθηκαν οι κατάλληλες ποσότητες ώστε να ληφθούν εργαστηριακά τσιμέντα επιθυμητής σύνθεσης. Για κάθε παραγόμενο τύπο τσιμέντου χρησιμοποιήθηκε η ίδια ποιότητα κλίνκερ. Τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά, καθώς και η ορυκτολογική κατά Bogue σύνθεση των κλίνκερ δίνεται στον πίνακα 1. Οι χημικές αναλύσεις έγιναν με χρήση XRF.

Πίνακας 1. Φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των κλίνκερ

Plant	Blaine	R40	SO_3	LSF	SM	AM	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Κλίνκερ No 1	3600	16	1.08	95.4	2.48	1.72	56.1	19.8	9.2	9.8
Κλίνκερ No 2	3600	18	1.38	96.2	2.51	1.66	57.0	18.3	8.7	9.7
Κλίνκερ No 3	3400	22	1.47	96.8	2.57	1.64	57.5	17.7	8.3	9.6

Από τον πίνακα 1 παρατηρείται ότι τα κλίνκερ που χρησιμοποιήθηκαν ήταν παραπλήσιες σύνθεσης.

Οι τύποι τσιμέντου και οι συνθέσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Στον ίδιο πίνακα για κάθε σύνθεση τσιμέντου δίνονται οι τιμές των θεικών και της θλιπτικής αντοχής 28 ημερών. Από τον πίνακα αυτό παρατηρείται ότι σε κάθε σύνθεση υπάρχει μία τιμή θεικών όπου επιτυγχάνεται ένα μέγιστο αντοχής. Η τιμή αυτή δεν είναι ίδια για όλους τους τύπους, αλλά δείχνει να έχει εξάρτηση από το ποσοστό του περιεχόμενου κλίνκερ.

Πίνακας 2. Τύποι, συνθέσεις τσιμέντου και αποτελέσματα δοκιμών

%Κλίνκερ	%Γύψος	%SO ₃	Αντοχή 28 ημ.	%Κλίνκερ	%Γύψος	%SO ₃	Αντοχή 28 ημ.
CEM I 42.5 ⁽¹⁾				CEM II A-L 42.5 ⁽¹⁾			
100	0	1.08	49.0	80	0	0.75	38.7
99	1	1.50	49.6	80	2	1.44	46.4
98	2	1.90	51.9	80	3	2.01	46.7
97	3	2.28	50.8	80	4	2.42	48.6
96	4	2.72	51.7	80	5	2.96	49.2
95	5	3.18	54.0	80	6	3.39	48.4
94	6	3.56	52.2	80	7	3.94	48.0
93	7	3.91	52.0				
CEM II B-M (P-L) 32.5 ⁽¹⁾				CEM IV B (P-W) 32.5 ⁽¹⁾			
65	0	0.76	31.7	62	0	1.36	42.7
65	1	1.18	36.4	62	1	1.78	43.8
65	2	1.78	36.9	62	2	2.20	44.9
65	3	2.13	38.1	62	3	2.57	46.6
65	4	2.58	36.5	62	4	3.13	46.1
65	5	3.05	35.3	62	5	3.44	44.1
65	6	3.51	35.8	62	6	3.82	42.2
65	7	3.94	33.9	62	7	4.14	43.1
CEM I 42.5 ⁽²⁾				CEM I 42.5 ⁽³⁾			
100	0	1.38	46.5	100	0	1.47	44.9
99	1	1.78	48.8	99	1	1.84	45.9
98	2	2.16	49.8	98	2	2.34	46.1
97	3	2.66	51.1	97	3	2.74	47.6
96	4	2.99	51	96	4	3.22	50.8
95	5	3.51	50.2	95	5	3.66	51.5
94	6	3.90	49.7	94	6	4.21	51.5
93	7	4.33	47.6	93	7	4.49	50

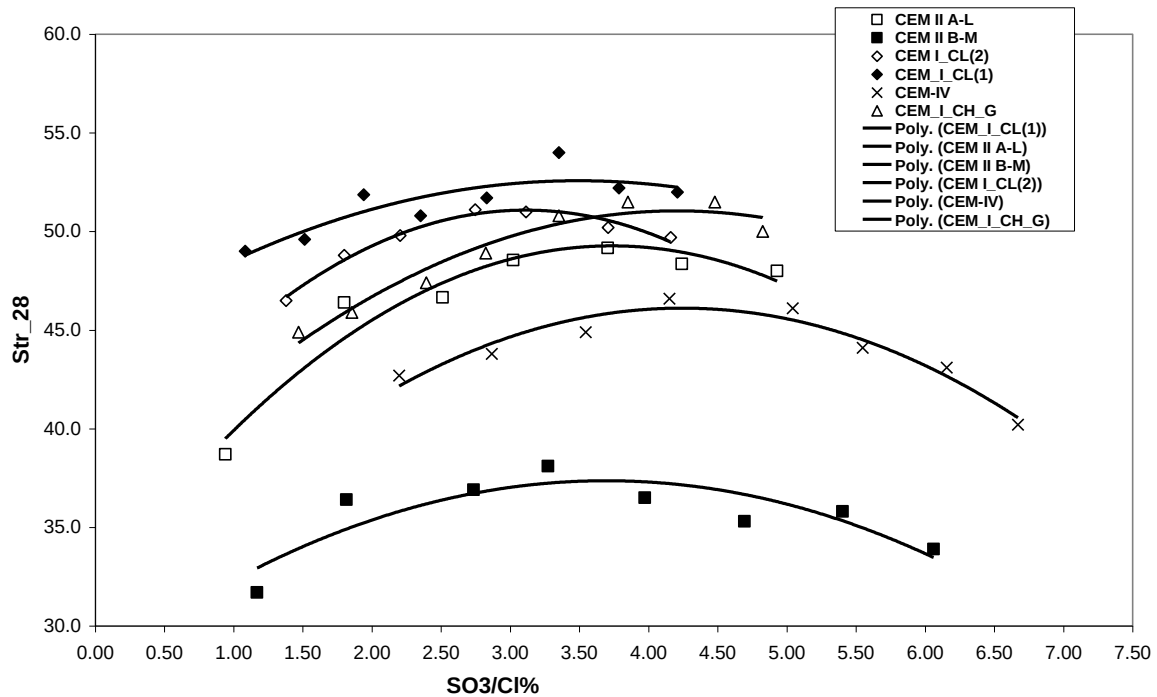
⁽¹⁾ Κλίνκερ No 1, ορυκτή γύψος

⁽²⁾ Clinker No 2, ορυκτή γύψος

⁽³⁾ Clinker No 3, γύψος FGD, χημική γύψος

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΜΕ ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΩΝ ΘΕΙΚΩΝ

Η μετρήσιμη ποσότητα με την οποία ρυθμίζεται το ποσοστό της γύψου είναι το περιεχόμενο %SO₃ του τσιμέντου. Εξάλλου στην τιμή των θεικών τίθενται άνω όρια από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1. Κατά την τρέχουσα παραγωγή των μύλων τσιμέντου σε τακτικά χρονιά διαστήματα μετρούνται τα θεικά του τσιμέντου και δίνονται οι αντίστοιχες αλλαγές στις πλάστιγγες ώστε να επιτυγχάνεται ο στόχος των %SO₃. Τα θεικά προέρχονται από την γύψο, ορυκτή ή χημική, το κλίνκερ, όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο πετκόκ, καθώς και την ιπτάμενη τέφρα. Για δεδομένο πετκόκ και λειτουργία της περιστροφική καμίνου, τα θεικά του κλίνκερ εμφανίζουν γενικά χαμηλές αποκλίσεις. Για δεδομένο επίσης προμηθευτή ορυκτής γύψου και το υλικό αυτό εμφανίζει χαμηλές αποκλίσεις. Για το λόγο λοιπόν ότι η βασική παράμετρος προς ρύθμιση είναι τα θεικά μελετήθηκε η συνάρτηση μεταξύ της αντοχής σε 28 ημέρες, Str₂₈ και του λόγου %SO₃/Κλίνκερ - %SO₃/Cl.



Σχήμα 1. Συσχέτιση αντοχής 28 ημερών με τον λόγο %SO₃/Κλίνκερ

Η συνάρτηση αυτή για όλες τις συνθέσεις που αναλύθηκαν δίνεται στο σχήμα 1. Για όλες τις συνθέσεις εκτός του CEM IV – συμπεριλαμβανόμενης της σύνθεσης που παρασκευάστηκε με χρήση FGD, το βέλτιστο εμφανίζεται στην περιοχή του 3.7%. Αντίθετα για τον τύπο CEM IV το βέλτιστο εμφανίζεται στην περιοχή του 4.3. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στην σύνθεση του CEM IV η μέση ιπτάμενη τέφρα ήταν 14% η οποία περιείχε θειικά 3.1%.

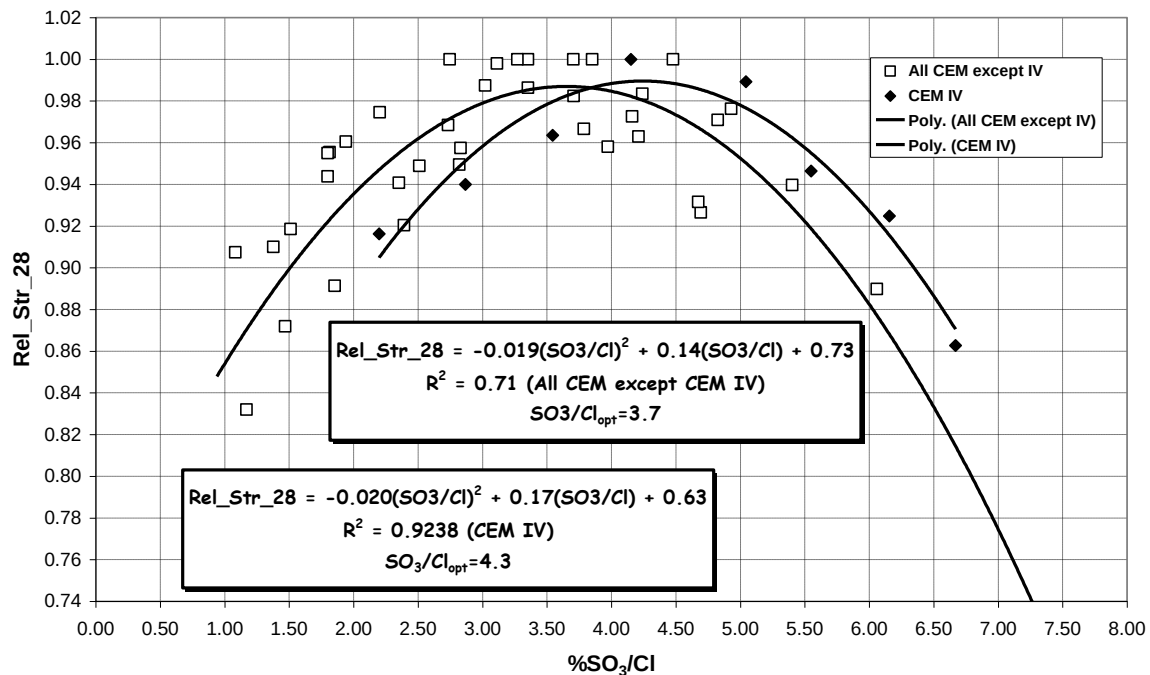
Για να διερευνηθεί αναλυτικότερα το παραπάνω θεωρείται για κάθε πειραματική αντοχή ενός ορισμένου τύπου τσιμέντου, η αδιάστατη μορφή της αντοχής, Rel_Str_28 , που δίνεται από τον λόγο της str_28 προς την μέγιστη αντοχή str_28_Max που παρατηρήθηκε για την δεδομένη αυτή σύνθεση:

$$Rel\_Str\_28 = \frac{Str\_28}{Str\_28\_Max} \quad (1)$$

Τα πειραματικά σημεία ομαδοποιήθηκαν σε δύο κατηγορίες:

- (i) Του τύπου CEM IV
- (ii) Όλα οι υπόλοιποι τύποι ασχέτως αν χρησιμοποιείται ορυκτή ή χημική γύψος

Τα αποτελέσματα και οι παραγόμενες εξισώσεις δίνονται στο σχήμα 2. Παρατηρούνται για τις δύο κατηγορίες σημείων δύο διακριτά βέλτιστα αντοχής σε διαφορετική περιοχή θεικών. Συμπερασματικά ενώ η χρήση χημικής γύψου δεν δείχνει να μεταβάλλει την θέση του βέλτιστου σε σχέση με την ορυκτή, στην περίπτωση τύπων τσιμέντου που περιέχουν σημαντικό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας, η μέγιστη αντοχή παρατηρείται σε διαφορετική θέση θεικών. Το γεγονός αυτό απαιτείται να λαμβάνεται απαραίτητα υπόψη στην τοποθέτηση του στόχου θεικών για τους διάφορους τύπους τσιμέντου, γύρω από τους οποίους θα ρυθμίζεται η περιεκτικότητα της γύψου.



Σχήμα 2. Αδιάστατη αντοχή συναρτήσει του λόγου %Γύψος/Κλίνκερ

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το άνω όριο θεικών που θέτει το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 εισάγει περιορισμούς στην τοποθέτηση του στόχου στην περιοχή του βελτίστου. Για παράδειγμα για ένα τσιμέντο CEM I 42.5 κατηγορίας πρώιμης αντοχής N με ποσοστό κλίνκερ ίσο με 95%, η εφαρμογή της αντίστοιχης εξίσωσης δίνει θειικά 3.5%, που είναι ακριβώς ίση με το άνω επιτρεπτό όριο. Με βάση την βιομηχανική εμπειρία ο στόχος πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.3% μικρότερος από το άνω όριο. Επίσης για τσιμέντο με σημαντικό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας, προκύπτει ότι για ποσοστό κλίνκερ μεγαλύτερο του 80%, δηλ. για CEM II A πρώιμης αντοχής N, το βέλτιστο είναι στην περιοχή θεικών 3.5%. Σε όλες τις άλλες κατηγορίες το βέλτιστο αντοχής βρίσκεται εντός των ορίων του προτύπου.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Στην προηγούμενη παράγραφο για μια ποικιλία συνθέσεων τσιμέντου που περιέχουν ορυκτές αλλά και εναλλακτικές α! ύλες, προσδιορίστηκε η βέλτιστη περιεκτικότητα σε SO₃, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη αντοχή 28 ημερών. Εφόσον υπάρχει τέτοιου τύπου συσχέτιση αναμένεται να υπάρχει και συσχέτιση της διασποράς των δύο μεγεθών:

Οι εξισώσεις που αναφέρονται στο σχήμα 3, ξαναγράφονται με την εξής μορφή:

$$Str\_28 = Str\_28\_Max \left(A \left(\frac{SO_3}{\%Cl} 100 \right)^2 + B \left(\frac{SO_3}{\%Cl} 100 \right) + C \right) \quad (2)$$

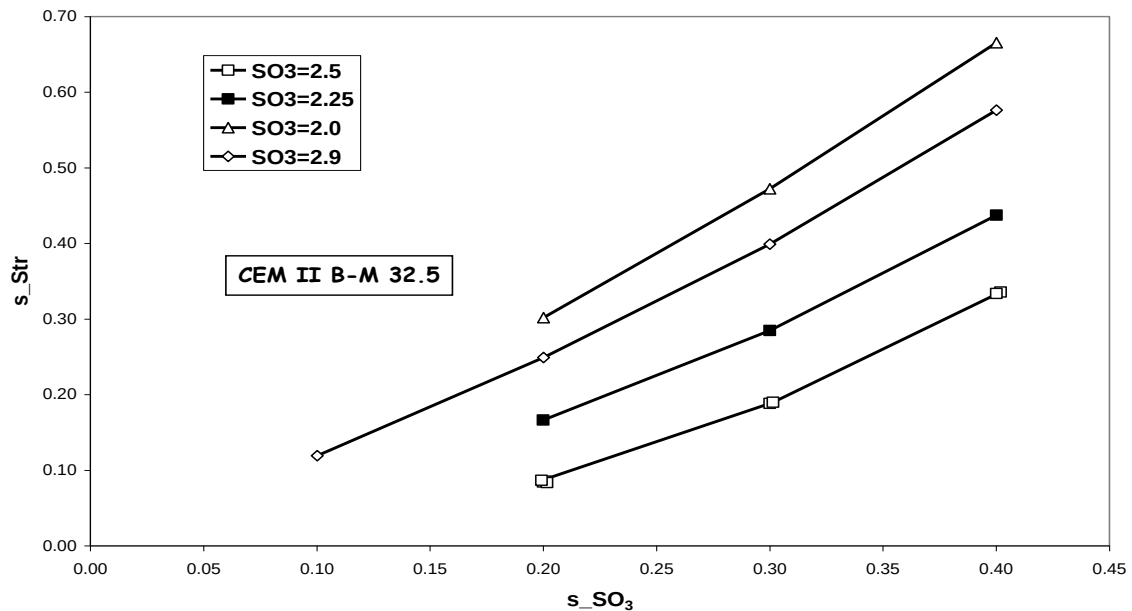
Σύμφωνα με το πρότυπο UNI CEI ENV 13005 (2000) η διασπορά της αντοχής δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_{Str}^2 = Str\_28\_Max^2 \left(\frac{2A * SO3}{\left(\frac{\%Cl}{100} \right)^2} + \frac{B}{\left(\frac{\%Cl}{100} \right)} \right)^2 \sigma_{SO3}^2 \quad (3)$$

Επομένως οι αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις συνδέονται με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{Str} = Str\_28\_Max * ABS \left(\frac{2A * SO3}{\left(\frac{\%Cl}{100} \right)^2} + \frac{B}{\left(\frac{\%Cl}{100} \right)} \right) \sigma_{SO3} \quad (4)$$

Από την σχέση (4) συνάγεται πως όταν η μέση τιμή SO_3 πραγματοποιεί τον στόχο και αυτός είναι τοποθετημένος στην περιοχή του βέλτιστου, τότε η επίδραση της απόκλισης των θεικών στην απόκλιση της αντοχής είναι πολύ μικρή, στην δε ιδανική περίπτωση 0. Στην αντίθετη περίπτωση όσο η μέση τιμή απομακρύνεται από το βέλτιστο, τόσο μεγαλύτερη η επίδραση της απόκλισης των θεικών στην απόκλιση της αντοχής. Όσον αφορά τις αναφερόμενες μεταβλητές η μεταβλητή στόχος θεικών είναι μεταβλητή της οποίας η τιμή προαποφασίζεται. Στη συνέχεια με μεταβλητή χειρισμού το ποσοστό της γύψου, ρυθμίζεται η μέση τιμή ώστε να είναι κοντά στον στόχο και να εμφανίζει την μικρότερη δυνατή τυπική απόκλιση.



Σχήμα 3. Επίδραση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των θεικών στην τυπική απόκλιση της αντοχής 28 ημερών.

Για να διευκρινιστούν καλύτερα τα παραπάνω θεωρείται η εξής εφαρμογή: Εστω ένα εργοστάσιο παράγει τσιμέντο CEM II B-M και το περιεχόμενο κλίνκερ είναι 67%. Ο στόχος αντοχής είναι 39

Μρα και αντιστοιχεί στην βέλτιστη αντοχή που υπολογίστηκε με δοκιμή βελτιστοποίησης θεικών. Από το σχήμα 2, προκύπτει ο στόχος θεικών ώστε να λαμβάνεται αυτή η μέγιστη τιμή που ισούται με 2.47%. Στη συνέχεια με βάση την σχέση (6) για διάφορα επίπεδα μέσης τιμής και τυπικές αποκλίσεις θεικών, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση της αντοχής. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 3.

Για να μελετηθεί παραπέρα τι σημαίνουν οι τιμές που αναφέρονται στο σχήμα 3, γίνονται οι εξής υποθέσεις: Το εργοστάσιο παράγει 1000 KT τσιμέντο αυτού του τύπου. Έστω ότι ο στόχος είναι τοποθετημένος στο βέλτιστο δηλ. στην τιμή 2.5 και μια απόκλιση των θεικών ίση με 0.20% χαρακτηρίζει την ομαλή λειτουργία. Στην περίπτωση αυτή η επίδραση στην απόκλιση είναι μόνο 0.08 Mpa. Έστω ότι η πραγματοποιημένη μέση τιμή λόγω μη επαρκούς ρύθμισης ή άγνοιας του βέλτιστου είναι 2.0% και η αντίστοιχη απόκλιση είναι 0.4%. Τότε η απόκλιση του τσιμέντου αυξάνει στην τιμή 0.67. Στην περίπτωση αυτή η αύξηση της απόκλισης από την βασική τιμή είναι $\Delta\sigma = (0.67^2 - 0.08^2)^{1/2} = 0.67$ Mpa. Το εργοστάσιο για να διατηρήσει το ίδιο κάτω όριο αντοχής, πρέπει να αυξήσει την μέση αντοχή κατά $2 \cdot 0.67 = 1.3$ Mpa. Σύμφωνα με το Τσαματσούλη (1999) για παραπλήσιες σύνθεσης τύπους τσιμέντου, αύξηση κατά 1% του περιεχόμενου κλίνκερ, αυξάνει την αντοχή κατά 0.5 Mpa. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως το εργοστάσιο πρέπει να αυξήσει την περιεκτικότητα σε κλίνκερ κατά 2.6%, ή κατά 26 KT σε ετήσια βάση. Αυτό αποτελεί μια πολύ σημαντική επιπλέον κατανάλωση ενέργειας, εφόσον είναι γνωστό ότι η παραγωγή κλίνκερ και τσιμέντου είναι από τους πλέον ενεργοβόρους κλάδους της βαριάς βιομηχανίας.

Άρα σε κάθε περίπτωση απαιτείται πειραματικός υπολογισμός του βέλτιστου θεικών, τοποθέτηση του στόχου στην περιοχή του βέλτιστου και συνεχής ρύθμιση της τρέχουσας παραγωγής ώστε να επιτυγχάνεται ο στόχος με την χαμηλότερη δυνατή απόκλιση. Η ανάγκη αυτή καθίσταται πλέον ισχυρή στην περίπτωση τσιμέντων CEM IV, όπου τα θεικά της ιπτάμενης τέφρας είναι σχετικά υψηλά αλλά και εμφανίζουν υψηλή απόκλιση. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η ύπαρξη σημαντικής αποθηκευμένης ποσότητας πριν την τροφοδοσία στους μύλους τσιμέντου, ώστε να δίνεται η δυνατότητα επαρκούς ανάμιξης της εισερχόμενης στο εργοστάσιο με την προϋπάρχουσα. Τα παραπάνω σημαίνουν αυξημένο όγκο εγκαταστάσεων και φυσικά επαρκή και αποτελεσματικό ποιοτικό έλεγχο.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση σχεδιασμό και εκτέλεση πειραμάτων, μαθηματική μοντελοποίηση και στατιστική ανάλυση επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση του ποσοστού των περιεχομένων θεικών στο τσιμέντο, όσον αφορά την θλιπτική αντοχή των 28 ημερών. Η ανάλυση περιλάμβανε εκτός του κλίνκερ τόσο ορυκτές α! ύλες, όσο και εναλλακτικές όπως γύψο προερχόμενη από μονάδα αποθείωσης (FGD) εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής – χημική γύψος – καθώς και ασβεστούχα ιπτάμενη τέφρα.

Όσον αφορά πέντε συνθέσεις τσιμέντου, που δεν περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, βρέθηκε κοινή βέλτιστη περιοχή ποσοστού θεικών, ανεξάρτητα εάν χρησιμοποιείται ορυκτή ή χημική γύψος. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει πως η χημική γύψος μπορεί να υποκαταστήσει την ορυκτή σε πολύ μεγάλο βαθμό, εάν βέβαια παραλαμβάνεται με ένα αποδεκτό ποσοστό υγρασίας και ομοιομορφίας όσον αφορά την σύσταση, ώστε να μπορεί να διαχειριστεί. Επιπλέον οποιαδήποτε άλλη σύνθεση που περιέχει ως συστατικά αυτά που χρησιμοποιήθηκαν, δηλ. κλίνκερ, γύψο ορυκτή ή χημική, ποζολάνη και ασβεστόλιθο αναμένεται να εμφανίζει την βέλτιστο περιεχόμενο θεικών στην ίδια περιοχή.

Όσον αφορά την σύνθεση τσιμέντου που περιλαμβάνει υψηλό ποσοστό ιπτάμενης τέφρας , η περιοχή του βέλτιστου βρίσκεται σε μια διακριτή περιοχή από την προηγούμενη απέχοντας 0.6 %SO₃ . Επομένως για τα τσιμέντα που περιέχουν ψηλό ποσοστό τέφρας απαιτείται ξεχωριστός έλεγχος του βέλτιστου. Βέβαια απαιτείται η εισαγόμενη στην μονάδα ή τροφοδοτούμενη ιπτάμενη τέφρα να έχει έναν αποδεκτό βαθμό ομοιομορφίας, διότι τέφρες με σημαντικά διαφορετικά ποσοστά θεικών αναμένεται να εμφανίζουν βέλτιστο σε διαφορετική περιοχή θεικών τσιμέντου όταν η σύνθεσή του διατηρείται σταθερή.

Η ανάλυση διασποράς υποδεικνύει πως όταν η πραγματοποιημένη μέση τιμή θεικών απέχει σημαντικά από την βέλτιστη ή και όταν η τρέχουσα ρύθμιση των θεικών δεν είναι επαρκής με αποτέλεσμα μεγάλη τυπική απόκλιση γύρω από την μέση τιμή τους, τότε προκαλείται σημαντική αύξηση της απόκλισης της αντοχής του τσιμέντου δηλ. χειροτέρευση της ποιότητάς του και αυξημένες ενεργειακές καταναλώσεις. Βέβαια πρέπει να τονιστεί πως όταν η τροφοδοτούμενη πρώτη ύλη είναι πολύ ανομοιόμορφη όσον αφορά την σύστασή της, τότε το έργο της ρύθμισης καθίσταται σημαντικά δυσκολότερο.

Ο σχεδιασμός και η εκτέλεση τέτοιου τύπου δοκιμών συμβάλλει σημαντικά στην βελτιστοποίηση των συνθέσεων του τσιμέντου και στην αξιοποίηση των εναλλακτικών πρώτων υλών που αναφέρθηκαν. Επιπλέον για την επιτυχή χρήση τους ώστε να αποφεύγονται η υποβάθμιση της ποιότητας και πλέον ενεργοβόρες διεργασίες παραγωγής , που μάλιστα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών του CO₂, είναι απαραίτητη η ύπαρξη σύγχρονων εγκαταστάσεων και τεχνικών αποθήκευσης, ανάμιξης και τροφοδότησης καθώς και ο διαρκής και πάνω από όλα αποτελεσματικός ποιοτικός έλεγχος και συνεχής ρύθμιση της τρέχουσας παραγωγής.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. ΕΛΟΤ EN 197-1, 2000. *Τσιμέντο – Μέρος 1: Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα*, Αθήνα, ΕΛΟΤ.
2. UNI CEI ENV 13005, 2000. *Guida all' espressione dell' incertezza di misura*, Milano, UNI – CEI.
3. Τσαματσούλης Δ., 1999. Συσχέτιση αντοχών τσιμέντου με φυσικές και χημικές ιδιότητες μέσω μαθηματικής μοντελοποίησης, *13^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος*, Τόμος II, σελ. 176-183.

ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΛΙΤΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΨΕΩΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΚΑΙ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Δ. Φραγκούλης, Χ. Τέας, Δ. Παπαγεωργίου, Ε. Χανιωτάκης

*Διεύθυνση Έρευνας & Ποιότητας, ΑΕ Τσιμέντων TITAN, Εργοστάσιο Καμαρίου, 19200 Ελευσίνα,
τηλ. +30 210 5537739*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η εκμετάλλευση κοιτασμάτων περλίτη για την παραγωγή διογκωμένων προϊόντων έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή εκτεταμένων απορρίψεων. Στην παρούσα δημοσίευση εξετάστηκε η δυνατότητα χρήσης τους στην παραγωγή τσιμέντου και κονιαμάτων. Έτσι παράχθηκαν εργαστηριακά τσιμέντα με προσθήκη περλιτικών απορρίψεων από τη Μήλο, οι ιδιότητες των οποίων τσιμέντων συγκρίθηκαν με τσιμέντα αναφοράς. Επιπλέον έγιναν εργαστηριακές συνθέσεις κονιαμάτων με χρήση παρόμοιων απορρίψεων και σύγκριση των ιδιοτήτων τους πάλι με αυτών των κονιαμάτων αναφοράς. Η προσθήκη περλιτικών απορρίψεων σε σύμμεικτα τσιμέντα και κονιάματα προσδίδει θετικές ιδιότητες στα τσιμέντα (αντοχές, απαίτηση σε νερό) και στα κονιάματα (αντοχές, ειδικό βάρος). Εφόσον και η ανθεκτικότητα των παραγόμενων προϊόντων είναι ικανοποιητική η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει στην εκμετάλλευση σημαντικών ποσοτήτων περλιτικών απορρίψεων.

Λέξεις κλειδιά: περλίτης, τσιμέντα, κονιάματα

EXPLOITATION OF PERLITE REJECTS FOR CEMENT AND MORTAR PRODUCTION

D. Fragoulis, C. Teas, D. Papageorgiou, E. Chaniotakis

*Department of R&D and Quality, TITAN Cement SA, Kamari Plant, 19200 Elefsina,
tel. +30 210 5537739*

ABSTRACT: The exploitation of perlite deposits for the production of expanded commercial products results into the production of large quantities of rejects. In the present paper the possibility of utilizing those rejects for cement and mortar production was studied. Therefore, laboratory cements were produced with addition of perlite rejects from the island of Milos and the cement properties were compared to those of a reference cement. Further more, laboratory trial mixes of mortars with the same rejects were evaluated and the mortar properties were compared again to those of reference mortars. Addition of perlite rejects in blended cements and mortars may result in enhanced cement (strength, water demand) and mortar properties (strength, specific weight). If the durability of the produced products is satisfactory, their use may lead to exploitation of significant quantities of perlite rejects.

Keywords: perlite, cement, mortars

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκε η συμπεριφορά δύο περλιτικών απορρίψεων στην παραγωγή τσιμέντου και κονιαμάτων. Οι απορρίψεις προέρχονται από την επεξεργασία περλίτη στις εγκαταστάσεις της S&B στην Μήλο. Τα υλικά χρησιμοποιήθηκαν ως είχαν στην σύνθεση κονιαμάτων με τσιμέντο ενώ συναλέστηκαν με κλίνκερ και γύψο σε εργαστηριακό μύλο για την παραγωγή τσιμέντου. Τα υλικά που εξορρύνονται στην περιοχή της Μήλου αποτελούν γενικά ικανοποιητικές ποζολανικές προσθήκες στο τσιμέντο (Stamatakis 1996, 2003), καθώς και σε κονιάματα με ασβέστη και τσιμέντο (Moropoulou 2004, 2005, Fragoulis 2005).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΩΝ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η χημική ανάλυση των υλικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 1. Περλιτικές απορρίψεις

Υλικό	Χαρακτηριστικά
Περλίτης-1	Συμπαραγόμενο περλιτικό υλικό κατά την κατάτμηση με μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία και κοκκομετρία -1,3 mm. Ετήσια παραγωγή 100 - 150.000 τόνοι.
Περλίτης-2	Συνπαραγόμενο ξηρό περλιτικό υλικό

Πίνακας 2. Χημική ανάλυση δειγμάτων περλίτη

Υλικό		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	Reac. SiO ₂
Περλίτης-1	%	75,08	12,47	0,14	1,02	0,21	1,26	4,05	3,02	2,75	38,0
Περλίτης-2	%	75,54	11,78	0,15	1,00	0,17	1,29	4,49	3,04	2,54	34,1

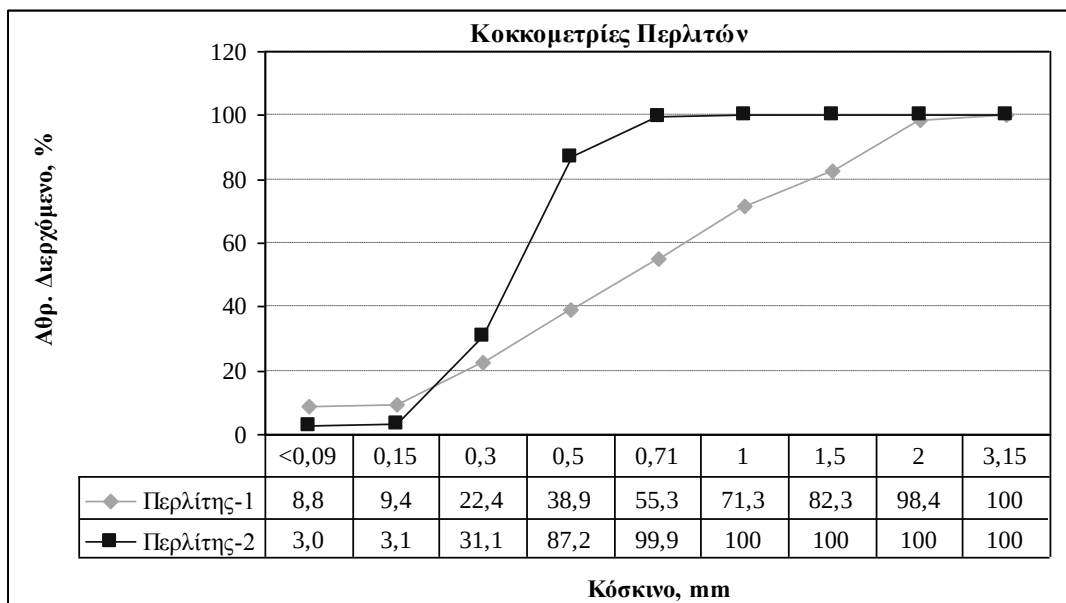
Η χημική σύσταση των δύο περλιτών είναι παρόμοια. Τα δύο υλικά είναι πλούσια σε πυρίτιο μέρος του οποίου είναι σε μορφή χαλαζία. Το δραστικό πυρίτιο υπερβαίνει το όριο του κανονισμού για χρήση σαν πρόσθετο στο τσιμέντο.

Οι κατανομές κοκκομετρίας για τα δείγματα Περλίτης-1, και Περλίτης-2 παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα 1.

Το ειδικό βάρος των δειγμάτων περλίτη παρουσιάζονται στον πίνακα 4. Όπως προκύπτει, τα δείγματα Περλίτης-1 και Περλίτης-2, έχουν ειδικό βάρος της τάξης του 2,3 gr/cm³.

Πίνακας 3. Ειδικό βάρος δειγμάτων περλίτη

Υλικό	Εδικό Βάρος (gr/cm ³)
Περλίτης-1	2,36
Περλίτης-2	2,32



Σχήμα 1. Διάγραμμα κοκκομετρικής κατανομής, % (αθροιστικό διερχόμενο - μέγεθος κοσκίνου mm για τα δείγματα)

Με βάση τα διαγράμματα περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ (XRD) προσδιορίστηκαν οι κρυσταλλικές φάσεις που υπάρχουν στα εξεταζόμενα δείγματα περλίτη. Οι ορυκτολογικές φάσεις που υπάρχουν σε κάθε δείγμα παρουσιάζονται στον πίνακα 4. Γενικά, η ορυκτολογική ανάλυση των περλιτικών υλικών δείχνει παρουσία υψηλού ποσοστού αμόρφου υλικού (φυσικό γυαλί) καθώς και παρουσία χαλαζία και ανορθίτη και είναι παρόμοια της ποζολάνης από Μήλο που χρησιμοποιείται στην παραγωγή τσιμέντου.

Πίνακας 4. Ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων περλίτη

Κρυστ. Φάση	Χαλαζίας (SiO ₂)	Αλβίτης / Ανορθίτης (Ca,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	Άμορφο υλικό
Περλίτης-1	✓	✓	✓
Περλίτης-2	✓	✓	✓
Μηλαϊκή γη	✓	✓	✓

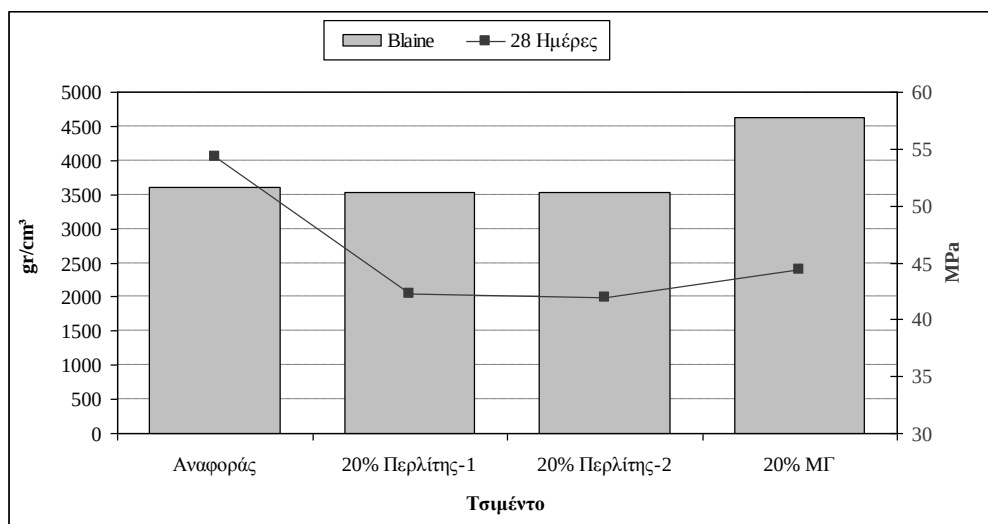
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Παρασκευή τσιμέντων

Για την παραγωγή των τσιμέντων έγινε συνάλεση κλίνκερ (75%), δειγμάτων περλιτικών απορίψεων (20%) και γύψου (5%) σε εργαστηριακό μύλο σε σταθερό χρόνο. Για σύγκριση χρησιμοποιήθηκε ποζολάνη από τη Μήλο με παρόμοιο ποσοστό δραστικού πυριτίου. Μετρήθηκαν οι κύριες ιδιότητες των τσιμέντων όπως απαίτηση σε νερό, χρόνος πήξης, αντοχές και Blaine. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα και στο ακόλουθο διάγραμμα.

Πίνακας 5. Ιδιότητες εργαστηριακών τσιμέντων

Τσιμέντο	Blaine	Χρόνος άλεσης	%H ₂ O	IST, min	FST, min	1	2	7	28
Αναφορά	3600	45	23,4	85	125	14,8	24,5	40,5	54,3
20% Περλίτης-1	3540	45	26,2	115	165	9,6	15,6	30,0	42,3
20% Περλίτης-2	3540	45	25,8	120	180	10,2	16,0	28,7	41,9
20% ΜΓ	4630	45	28,8	130	170	11,5	18,5	31,8	44,4



Εικόνα 2. Αντοχές και ειδική επιφάνεια τσιμέντων.

Η χρήση των περλιτικών απορρίψεων ως ποζολάνη δυσχεραίνει την αλεσιμότητα του τσιμέντου σε σχέση με την υπάρχουσα μηλαική γη. Επίσης η διαφορά στην κοκκομετρία μεταξύ των δύο υλικών φαίνεται ότι η χρήση του λεπτόκοκκου περλίτη δεν επηρεάζει σημαντικά την αλεσιμότητα του τσιμέντου.

Η απαίτηση σε νερό των παραγόμενων με απορρίψεις τσιμέντων βρίσκεται ενδιάμεσα του δείγματος αναφοράς και αυτών με μηλαική γη. Οι αντοχές των δειγμάτων με απορρίψεις υστερούν αυτών με μηλαική γη αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαφορά στην ειδική επιφάνεια των τσιμέντων.

Συνθέσεις κονιαμάτων

Η παραγωγή κονιαμάτων έγινε με προσθήκη των υλικών Περλίτης-1, και Περλίτης-2 ως έχουν. Για την παραγωγή χρησιμοποιήθηκαν επίσης ασβεστολιθική άμμος, τσιμέντο τύπου CEM I-42.5, υδράσβεστος σε σκόνη, καθώς και χημικά πρόσθετα (αιθέρας κυτταρίνης, αερακτικό και συμπολυμερή. Τα χαρακτηριστικά του τσιμέντου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 και της υδρασβέστου στον Πίνακα 7.

Πίνακας 6. Ιδιότητες τσιμέντου

Blaine	IST (min)	FST (min)	H ₂ O (%)	7d (MPa)	28d (MPa)
3600	120	170	25.3	38.4	51.5

Πίνακας 7. Ιδιότητες υδρασβέστου

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI	Ca(OH) ₂	CaCO ₃
%	0.17	0.18	0.07	70.06	2.35	0.77	25.60	89.10	5.98

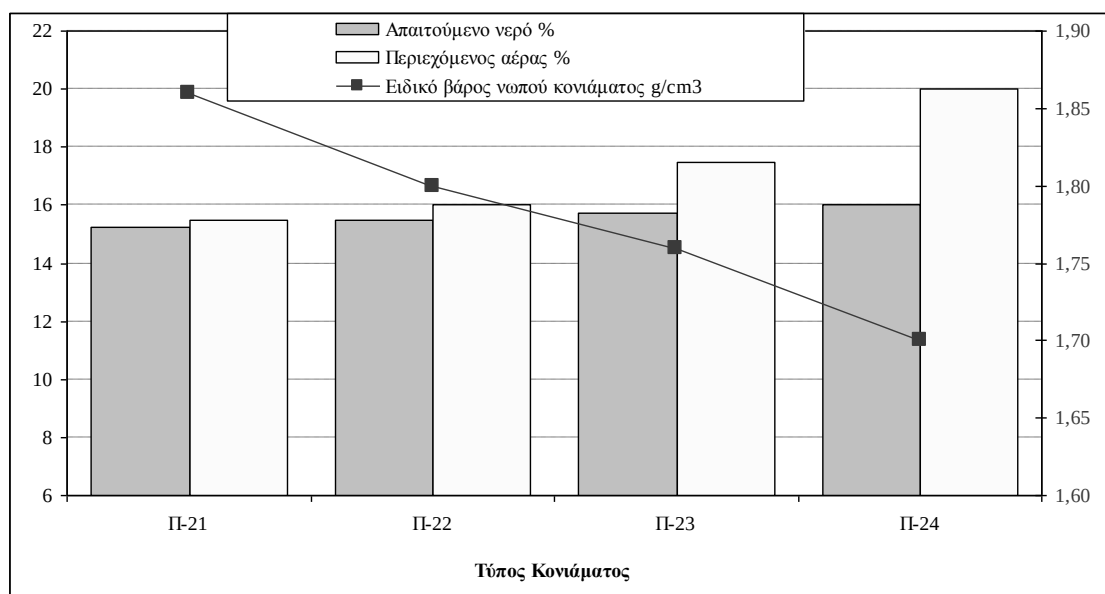
Οι συνθέσεις των κονιαμάτων παρουσιάζονται στους Πίνακες 8Α και Β, μαζί με τα αποτελέσματα για το νωπό και σκληρυμένο κονίαμα. Η απαίτηση σε νερό προσδιορίστηκε βάσει του προτύπου EN 1015-2 και η εξάπλωση κατά το EN 1015-3 (flow table method). Η πυκνότητα του νωπού κονιάματος (EN 1015-6), το ποσοστό αέρα (EN 1015-7), η συγκράτηση νερού (EN 1015-8), οι αντοχές θλίψης και κάμψης (EN1015-11) και ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης (EN 1015-18) ήταν οι άλλες ιδιότητες που προσδιορίστηκαν.

Παρατηρείται ότι σε κονιάματα απουσία υδρασβέστου είναι χαμηλή η ανάπτυξη αντοχών μετά τις 28ημ. Η παρουσία υδρασβέστου δείχνει να ενεργεί θετικά στην δραστικότητα του πυριτίου των περλιτικών απορρίψεων και την βελτίωση των αντοχών των κονιαμάτων ειδικά μετά τις 28 ημ.(Shi, 2001).

Όλα τα υλικά επιδρούν στην απαίτηση σε νερό αυξάνοντας την. Τα υλικά επιδρούν επίσης στο ειδικό βάρος του κονιάματος οδηγώντας σε ελαφρύτερα κονιάματα, αφού και το ειδικό βάρος των περλιτικών απορρίψεων είναι χαμηλότερο του ασβεστόλιθου. Επίσης ο συντελεστής υδατοαπορρόφησης των κονιαμάτων δεν μεταβάλλεται με την χρήση των υλικών.

Πίνακας 8Α. Συνθέσεις κονιαμάτων

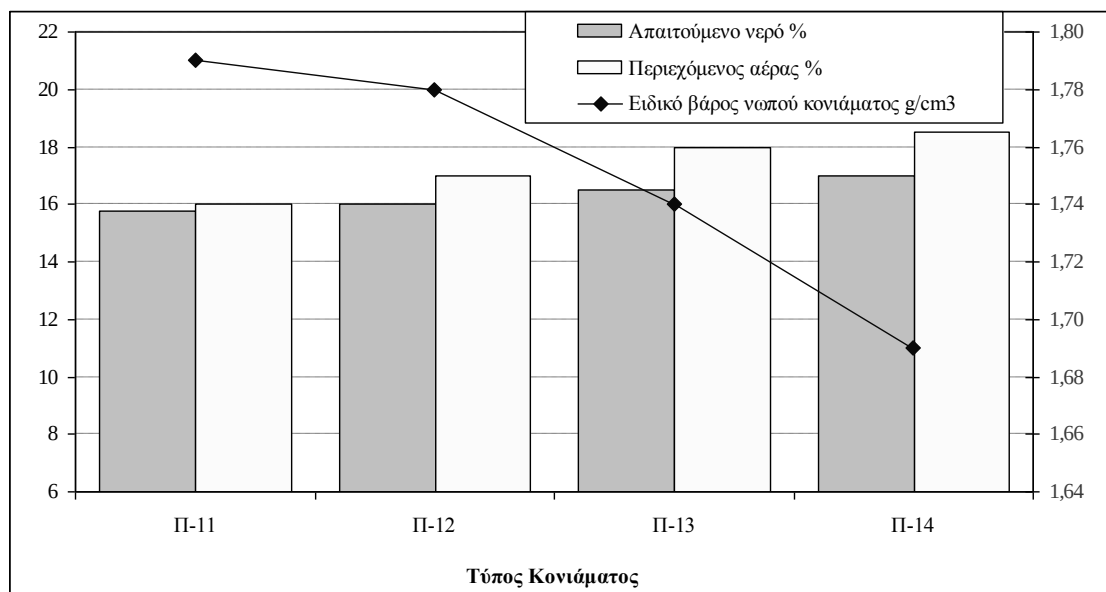
ΣΥΝΘΕΣΗ/ΤΥΠΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ	Π-21	Π-22	Π-23	Π-24
Ασβεστολιθική άμμος	91	86	81	71
Τσιμέντο CEM I-42,5	8	8	8	8
Υδράσβεστος	1	1	1	1
Περλίτης 2	0	5	10	20
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ				
Απαιτούμενο νερό %	15,25	15,5	15,75	16
Εξάπλωση cm	17,5	17,5	17,8	17,4
Συγκρατούμενο νερό %	89,4	90,6	88,5	88,6
Περιεχόμενος αέρας %	15,5	16,0	17,5	20,0
Ειδικό βάρος νωπού κονιάματος g/cm ³	1,86	1,80	1,76	1,70
Αντοχή θλίψης 7 ΗΜ (Μpa)	1,7	1,7	1,9	1,3
Αντοχή θλίψης 28 ΗΜ (Μpa)	3,4	3,3	3,8	3,1
Αντοχή θλίψης 60 ΗΜ (Μpa)	5,2	4,8	4,5	3,7
Αντοχή κάμψης 7 ΗΜ (Μpa)	0,8	0,8	0,9	0,7
Αντοχή κάμψης 28 ΗΜ (Μpa)	1,5	1,2	1,6	1,3
Αντοχή κάμψης 60 ΗΜ (Μpa)	2,0	1,8	1,8	1,6
Συντελεστής υδατοαπορρόφησης (Kg/m ² /min ^{1/2})	1,5	---	1,4	---



Εικόνα 3. Απαιτούμενο νερό, περιεχόμενος αέρας, ειδικό βάρος κονιαμάτων

Πίνακας 8B. Συνθέσεις κονιαμάτων

ΣΥΝΘΕΣΗ/ΤΥΠΟΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ	Π-11	Π-12	Π-13	Π-14
Ασβεστολιθική άμμος	90,5	85,5	80,5	70,5
Τσιμέντο CEM I-42,5	9,5	9,5	9,5	9,5
Περλίτης-1	0	5	10	20
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ				
Απαιτούμενο νερό %	15,75	16	16,5	17
Εξάπλωση cm	17,3	17,0	17,1	17,1
Συγκρατούμενο νερό %	92,9	91,3	91,4	90,3
Περιεχόμενος αέρας %	16,0	17,0	18,0	18,5
Ειδικό βάρος νωπού κονιάματος g/cm ³	1,79	1,78	1,74	1,69
Αντοχή θλίψης 7 HM (MPa)	2,1	2,3	1,8	1,5
Αντοχή θλίψης 28 HM (MPa)	4,3	4,3	3,7	3,0
Αντοχή θλίψης 60 HM (MPa)	4,5	4,5	4,0	3,3
Αντοχή κάμψης 7 HM (MPa)	0,8	1,0	0,7	0,7
Αντοχή κάμψης 28 HM (MPa)	2,0	1,9	1,7	1,5
Αντοχή κάμψης 60 HM (MPa)	2,1	2,0	1,9	1,6
Συντελεστής υδατοαπορρόφησης (Kg/m ² /min ^{1/2})	1,1	---	1,2	---



Εικόνα 4. Απαιτούμενο νερό, περιεχόμενος αέρας, ειδικό βάρος κονιαμάτων

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, οι περλιτικές απορρίψεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ποζολάνες στην παραγωγή τσιμέντου, υποκαθιστώντας ήδη χρησιμοποιούμενες ποζολάνες. Από τα πειράματα φαίνεται ότι η ανάπτυξη αντοχών του παραγόμενου τσιμέντου είναι ικανοποιητική ενώ ικανοποιούν και το όριο του κανονισμού ως προς το δραστικό πυρίτιο. Παρουσιάζουν όμως μικρότερη αλεσιμότητα σε σχέση με άλλες ποζολάνες.

Επιπλέον είναι δυνατή η προσθήκη των περλιτικών απορρίψεων σε κονιάματα υποκαθιστώντας μέρος των αδρανών σε ποσοστά ως και 10%. Οι απορρίψεις επιδρούν θετικά στο ειδικό βάρος των κονιαμάτων αλλά έχουν τάση να αυξάνουν την απαίτηση σε νερό.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Fragoulis, D. Stamatakis, M. Teas, C. Chaniotakis, E. Papageorgiou, D. 2005. Utilization of masonry mortars produced with diatomaceous silica and volcanic glass-rich rocks. A case study from Zakynthos and Milos Islands, Greece, 10th Euroseminar on Microscopy applied to building materials, Paisley.
2. Moropoulou, A., Bakolas, A., Aggelakopoulou, E. 2004. Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis, *Thermochimica Acta*, 420: 135-140.
3. Moropoulou, A., Bakolas, A., Anagnostopoulou, S. 2005. Composite materials in ancient structures, *Cement & Concrete Composites*, 27: 295-300.
4. Shi, C. 2001. An overview of the activation of reactivity of natural pozzolans, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28: 778-786.
5. Stamatakis, M.G., Lutat, U., Ragueiro, M. and Calvo, J.P. 1996. Milos. The mineral island. *Industrial Minerals*, February 1996, London, 57-61.

6. Stamatakis, M.G, Fragoulis, D., Csiric, G., Bedeleian, I., Pedersen, S. 2003. The influence of biogenic micro-silica-rich rocks on the properties of blended cements, *Cement & Concrete Composites*, 25: 177-184.

ΧΡΗΣΗ ΣΚΩΡΙΩΝ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΔΟΜΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Δ. Παπαρρήγας

*Μεταλλουργός Μηχανικός Μ.Π.Α.-ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε., 12ο Χλμ. Ε.Ο. Θεσσαλονίκης-Βέροιας Τ.Θ. 59,
Τ.Κ. 57008 Ιωνία Θεσσαλονίκη, Τηλ. 2310790175 Fax: 2310790192
e-mail: dpaparrig@sidenor.vionet.gr*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ένα από τα παραπροϊόντα της βιομηχανίας παραγωγής χάλυβα είναι οι σκωρίες του ηλεκτρικού κλιβάνου. Οι σκωρίες αποτελούν το μεγαλύτερο σε ποσότητα παραπροϊόν. Η πιο συνηθισμένη χρήση των σκωριών του κλιβάνου είναι ως αδρανούς υλικού στην κατασκευή αντιστοιχισμένων ταπήτων οδοποιίας. Για την διαχείριση των σκωριών η «ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε» έχει προχωρήσει στη δημιουργία δύο εγκαταστάσεων παραγωγής σκληρών αδρανών οδοποιίας με συνολική παραγωγική δυναμικότητα 200.000 τόνων ανά έτος. Η εταιρία κατά την τελευταία πενταετία έχει επιτύχει υψηλό βαθμό αρτιότητας στην οργάνωση, τις παραγωγικές διαδικασίες και τον έλεγχο των τελικών προϊόντων.

Λέξεις κλειδιά: βιομηχανικά παραπροϊόντα, αδρανή οδοποιίας, σκωρία

USE OF STEEL SLAG IN STRUCTURAL INDUSTRY AND IN ROAD CONSTRUCTIONS

D. Paparrigas

*Metallurgical Engineer-Aeiforos S.A., 12th klm. Thessaloniki-Veroia Rd, P.O .Box: 59, 57008
Ionia, Thessaloniki., Tel. +302310790175 Fax: +302310790192
e-mail dpaparrig@sidenor.vionet.gr*

ABSTRACT: One of the major by-products during the steel making process is the Electric Arc Furnace (EAF) slag. Once scorned as a useless by-product, it is now known to be a valuable material with many uses, the most popular being the use as aggregate for bituminous mixtures for anti-skid road surfaces. For the treatment of the EAF slags and the subsequent production of slag aggregates AEIFOROS SA has invested in the construction of two plants with a production capacity of approximately 200.000 tones per annum. In the past five years the company has achieved high production, organizational and quality control standards.

Keywords: industrial by-products, road paving aggregates, EAF Slag

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι «σκωρίες» είναι μεταλλουργική έκφραση που περιγράφει γενικά τα μη μεταλλικά ορυκτά συστατικά μέρη και διακρίνονται από τις τέφρες, που αποτελούν κατάλοιπα καύσης. Κατά τη βιβλιογραφία, η σκωρία του ηλεκτρικού κλιβάνου είναι ένα βιομηχανικά ληφθέν τεχνητό πέτρωμα, του οποίου η χημική σύνθεση, η ορυκτολογική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες είναι ανάλογες των μαγματικών πετρωμάτων (π.χ. Βασάλτης ή γρανίτης).

Η ποσότητα που παράγεται στα χαλυβουργεία, ως παραπροϊόν της παραγωγικής διαδικασίας, αποτελεί ποσοστό περίπου 13%-18% επί της συνολικής ποσότητας τροφοδοσίας του κλιβάνου με αποτέλεσμα οι μεταλλουργικές σκωρίες να είναι ένα από τα μεγαλύτερα σε ποσότητα βιομηχανικά παραπροϊόντα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι κατά το έτος 2000 η συνολική παραχθείσα ποσότητα σκωριών στην Γερμανία, συμπεριλαμβανομένων και των σκωριών υψικαμίνων, ήταν περίπου πέντε εκατομμύρια τόνοι ενώ η υπολογίζεται ότι η συνολική ποσότητα στην Ελλάδα είναι περίπου 350.000 τόνοι ανά έτος.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

Από τις αρχές του 20ου αιώνα, κυρίως λόγω της αφθονίας του υλικού σε απόθεση και της μηδενικής αξίας για τους παραγωγούς χάλυβα, η εκμετάλλευση των σκωριών από υψικαμίνους έγινε αντικείμενο πολλών ερευνών. Σύντομα άρχισε να γίνεται κατανοητό ότι το παραπροϊόν αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στις κατασκευές και να μην είναι ένα «προς απόρριψη» υλικό. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε σε ευρεία κλίμακα για την κατασκευή υδραυλικών έργων, κυρίως φραγμάτων και στη συνέχεια ως δομικό υλικό. Από το 1960 έως και σήμερα γίνεται συστηματική επεξεργασία και η χρήση σκωριών λαμβάνει συνεχώς μεγαλύτερη έκταση με συνέπεια να θεωρείται ένα πολύτιμο υλικό ειδικότερα για τις κατασκευές και την οδοποιία. Σήμερα σε πολλές χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης όπως Μ. Βρετανία, Γερμανία, Γαλλία, Δανία, Ολλανδία, Βέλγιο και άλλες η χρήση των σκωριών στην οδοποιία για χρήση σε όλα τα επίπεδα οδοστρώσεως καθώς και για χρήση στη βιομηχανία του τσιμέντου αποτελούν κοινές πρακτικές.

Στο κείμενο που ακολουθεί, παρουσιάζεται περιληπτικά η διαδικασία παραγωγής της μεταλλουργικής σκωρίας κατά την τήξη παλαιού σιδήρου για την παραγωγή χάλυβα. Στη συνέχεια ακολουθεί σύντομη αναφορά στην διαδικασία παραγωγής των σκύρων οδοποιίας που αποτελεί και το κύριο παραγωγικό αντικείμενο της εταιρίας. Στο τέλος γίνεται μια σύντομη αναφορά σε άλλα πεδία χρήσης του υλικού όπως είναι η παραγωγή σκύρων για λεπτοτάπητες και άμμου αμμοβολής, και επίσης των εργαστηριακών δοκιμών και μετρήσεων που πραγματοποιούνται πριν και μετά την παραγωγική διαδικασία.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΣΚΩΡΙΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΛΙΒΑΝΟΥ

Η πρώτη ύλη για την παραγωγή χάλυβα είναι ο παλαιοσίδηρος (Scrap). Αμέσως μετά την παραλαβή του οδηγείται σε μονάδα άλεσης (shredder) όπου και διαχωρίζεται σε σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέρη. Τα μη-σιδηρούχα μέρη οδηγούνται για περαιτέρω επεξεργασία και ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων όπως ο χαλκός και το αλουμίνιο. Οι σιδηρούχες ύλες προωθούνται στον κλίβανο για τήξη όπου με προσθήκη συλλιπασμάτων μίγματος ασβέστη και μαγνησίας προκαλείται αφρισμός του σιδήρου και δημιουργείται σκωρία. Η θερμοκρασία της σκωρίας μέσα

στον κλίβανο είναι όπως και του σιδήρου, μεταξύ 1400°C και 1600°C. Η σκωρία η οποία επιπλέει πάνω στο λιωμένο σίδηρο διαχωρίζεται και οδηγείται, μέσω ειδικής θυρίδας που βρίσκεται στο χείλος του κλιβάνου, στο χώρο συγκέντρωσης όπου ψύχεται. Η απότομη ψύξη των σκωριών είναι επιβεβλημένη για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι για να διευκολυνθεί η διαχείριση τους λόγω των πολύ υψηλών θερμοκρασιών και ο δεύτερος και πιο σημαντικός για να αποκτήσει η σκωρία μια υαλοειδή δομή η οποία προσδίδει στο υλικό τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες. Η ψύξη επιτυγχάνεται με καταιγισμό νερού μέχρι το υλικό να φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Μετά την πρώτη φάση της ψύξης του υλικού η οποία λαμβάνει χώρα πλησίον του χαλυβουργείου, ακολουθεί φόρτωση και μεταφορά για περαιτέρω επεξεργασία. Σε αυτό το σημείο η σκωρία παύει να είναι παραπροϊόν και υλικό των χαλυβουργιών και αποτελεί πρώτη ύλη για την εταιρία ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.

Η παραγωγική διαδικασία αποτελείται από σειρά μηχανικών διεργασιών εν ξηρώ, κατά σειρά προδιαλογή για την απομάκρυνση μεγάλων τεμαχίων, αποσιδήρωση, πρωτογενή θραύση, δευτερογενή θραύση και τελικά παραγωγή των τελικών προϊόντων από διαδοχικές κοσκινίσεις. Τα αδρανή που παράγονται ταξινομούνται σε διάφορα κλάσματα και αποθηκεύονται σε σωρούς στις πλατείες τελικών προϊόντων. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι για την διαχείριση και την συνολική επεξεργασία της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου έχει υιοθετηθεί και εφαρμόζεται πλήρως η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αφορά στις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (BAT).

Ως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, στο πρώτο στάδιο της επεξεργασίας της η σκωρία οδηγείται στο χώρο αποσιδήρωσης όπου αρχικά αφαιρούνται τα μεγάλα τεμάχια και στη συνέχεια με μαγνητικά μέσα γίνεται διαχωρισμός του περιεχόμενου σιδήρου. Αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο αφενός για τον διαχωρισμό μη θραυστών υλικών, που δεν επιτρέπεται να περιέχονται στα αδρανή υλικά και αφετέρου στην ανακύκλωση και επιστροφή προς τήξη των εγκλωβισμένων σε αυτή μετάλλων.

Η δεύτερη φάση επεξεργασίας περιλαμβάνει τις ακόλουθες μηχανικές διεργασίες:

- α) Πρωτογενή και δευτερογενή θραύση.
- β) Αποσιδήρωση.
- γ) Κοκκομετρική διαβάθμιση.

Η διαδικασία επεξεργασίας των σκωριών ξεκινά με την πρωτογενή θραύση του υλικού όπου επιτυγχάνεται η ομογενοποίηση του και επιπλέον απεγκλωβίζονται μεταλλικά μέρη τα οποία είχαν διαφύγει της αρχικής αποσιδήρωσης. Τα σιδηρούχα απομακρύνονται από την σκωρία με μαγνητικό διαχωρισμό και τροφοδοτούνται εκ νέου στον ηλεκτρικό κλίβανο.

Ακολουθεί δευτερογενής θραύση και διαδοχικές ταξινομήσεις του υλικού σε κόσκινο συντονισμού όπου διαβαθμίζονται ανάλογα με την κοκκομετρία τους, για να παραχθούν έτσι τα επιθυμητά τελικά προϊόντα. Η συνολική παραγόμενη ποσότητα σκύρων οδοποιίας από σκωρία ηλεκτρικού κλιβάνου ανέρχεται σε 110.000 τόνους ετησίως ενώ η συνολική δυναμικότητα των γραμμών παραγωγής ξεπερνά τις 250.000 τόνους τελικών προϊόντων. Για την κάλυψη των αναγκών παραγωγής η εταιρία έχει προχωρήσει στην κατασκευή δύο σύγχρονων εγκαταστάσεων θραύσης. Στην Εικόνα 1 φαίνεται η εγκατάσταση της γραμμής παραγωγής του υποκαταστήματος της Θεσσαλονίκης.



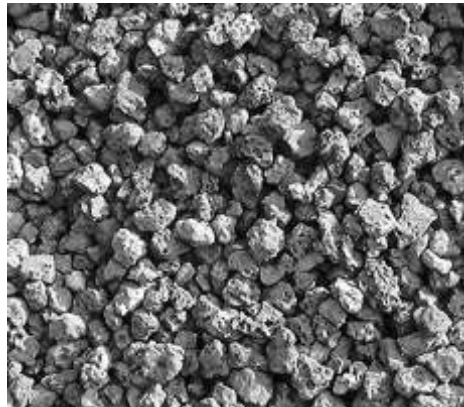
Εικόνα 1. Μονάδα επεξεργασίας σκωριών ηλεκτρικού κλιβάνου

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Κατά την παραλαβή του το υλικό ελέγχεται οπτικά ως προς τη φύση και την ομοιομορφία του ενώ πραγματοποιείται και τακτική δειγματοληψία για τον έλεγχο της χημικής του σύστασης. Η χημική σύσταση της σκωρίας εξαρτάται άμεσα από την διαδικασία παραγωγής χάλυβα και η σταθερότητα αυτής αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα των παραγομένων προϊόντων έναντι του ανταγωνισμού. Μια τυπική χημική σύσταση φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τυπική χημική σύσταση σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου.	
ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ %
ΟΞΕΙΔΙΟ ΑΣΒΕΣΤΙΟΥ CaO	20-35
ΟΞΕΙΔΙΟ ΠΥΡΙΤΙΟΥ SiO_2	10-20
ΟΞΕΙΔΙΟ ΣΙΔΗΡΟΥ FeO_2	20-35
ΟΞΕΙΔΙΟ ΜΑΓΝΗΣΙΟΥ MgO	4-8
ΟΞΕΙΔΙΟ ΜΑΓΓΑΝΙΟΥ MnO	3-6
ΟΞΕΙΔΙΟ ΑΡΓΙΛΙΟΥ Al_2O_3	2-6

Το υλικό ελέγχεται και κατά την παραγωγική διαδικασία σε όλα τα στάδια της επεξεργασίας με μη καταστροφικούς ελέγχους, ως προς την κοκκομετρική του διαβάθμιση και την ομοιομορφία του πριν γίνει εναπόθεση σε σωρούς ως τελικό προϊόν. Στην Εικόνα 2 φαίνεται τμήμα από σωρό διαβαθμισμένης σκωρίας σε διαβάθμιση 5-12mm για χρήση στην οδοποιία.



Εικόνα 2. Φωτογραφία σκύρων οδοποιίας 5-12mm για αντισλυσθητικούς τάπητες.

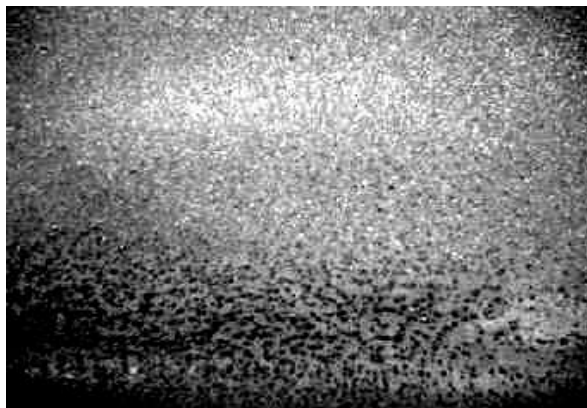
Στη συνέχεια γίνονται μετρήσεις για να διαπιστωθεί η καταλληλότητα και η ανταπόκριση στις εκάστοτε τεχνικές προδιαγραφές και ειδικότερα σε εκείνες των αντισλυσθηρών ταπήτων ως προς τις μηχανικές ιδιότητες, τη χημική σύσταση, την κοκκομετρία και το σχήμα των κόκκων. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται λίστα των μηχανικών ιδιοτήτων των σκωριών ηλεκτρικού κλιβάνου.

Πίνακας 2. Τιμές ελέγχου μηχανικών ιδιοτήτων	
ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΔΕΙΚΤΗΣ
ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΤΙΑΒΩΣΗΣ	PSV=64
ΣΥΝΤΕΛΕΣ. LOS ANGELES	LA=15
ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΠΟΤΡΙΨΗΣ	AAV=3
ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΓΕΙΑΣ	SD=6
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ	ACV=9
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΣΥΝΤΡΙΒΗ	AIV=4
ΔΕΙΚΤΗΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	SF=0.65
ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΚΟΕΙΔΩΝ	FL=14
ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΠΙΜΗΚΩΝ	EL=9

ΓΕΝΙΚΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΣΚΩΡΙΩΝ

Η χρήση των σκωριών ηλεκτρικού κλιβάνου ως αδρανή υλικά οδοποιίας είναι μια πολύ συνηθισμένη πρακτική. Οι πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες των σκωριών κάνουν το υλικό ιδανικό για την κατασκευή αντισλυσθηρών ταπήτων, όπως επίσης και για εφαρμογές οι οποίες είναι λιγότερο διαδεδομένες στη χώρα μας όπως αυτή των λεπτοταπήτων (μίγματα Slurry) για επιφανειακές και διορθωτικές οδοστρώσεις.

Άλλες πιθανές χρήσεις που εξετάζονται είναι η παρασκευή κυβόλιθων, η χρήση τους σε υδραυλικά έργα και τέλος η χρήση τους στη παρασκευή σκυροδέματος. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αναφέρονται η πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλές θερμοκρασίες, η αδιαπερατότητα τους από το νερό.



Εικόνα 3. Αμμοβολή μεταλλικής επιφάνειας με σκωρία διάστασης 0,5mm-2,0mm.

Ένας σχετικά καινούριος τομέας στον οποίο η εταιρία έχει δραστηριοποιηθεί είναι η παραγωγή άμμου αμμοβολής για την προετοιμασία μεταλλικών επιφανειών (Εικόνα 3) και εφαρμογές σε τοιχοποιίες για αναπαλαιώσεις κτιρίων. Για την χρήση αυτή έχουν πραγματοποιηθεί οι απαραίτητες δοκιμές και προχωρούν οι διαδικασίες πιστοποίησης. Εκτιμάται ότι σε ετήσια βάση θα διατίθενται περίπου 15.000-25.000 τόνοι άμμου αμμοβολής. Το κύριο πλεονέκτημα της άμμου αμμοβολής από σκωρία κλιβάνου, όπως παρατηρήθηκε κατά τις δοκιμές, είναι η υψηλή ταχύτητα καθαρισμού των επιφανειών. Αυτό οφείλεται κυρίως στην σκληρότητα αλλά και στη γωνιώδη φύση του υλικού σε κοκκομετρίες κάτω των 1,5mm.

Η πιο διαδεδομένη παγκοσμίως χρήση της σκωρίας είναι στο σκυρόδεμα κυρίως σαν συνδετικό υλικό, αντικαθιστώντας μερικώς το τσιμέντο Πόρτλαντ. Σε ορισμένες εφαρμογές υπάρχει υποκατάσταση σε ποσοστό έως και 50% για την παρασκευή σκυροδέματος υψηλών αντοχών. Είναι προφανές ότι με την αντικατάσταση των αδρανών από αποκαμινεύματα σκωρίας παράγεται «βαρύ» σκυρόδεμα το οποίο ενδεικτικά αναφέρεται ότι το φαινόμενο ειδικό βάρος του μπορεί να είναι της τάξης του 2,70-2,90 και μπορεί να τύχει εφαρμογής σε ανάλογα έργα (φράγματα, τοίχοι προστασίας, δάπεδα κτλ). Με βάση τα παραπάνω δεδομένα την παρούσα περίοδο πραγματοποιούνται σε συνεργασία με άλλες εταιρίες δοκιμαστικές παραγωγές προϊόντων όπως οι πλάκες πεζοδρομίου, ιδιαίτερα ανθεκτικές σε αλκαλικό περιβάλλον.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ

Οι θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση αδρανών οδοποιίας από σκωρίες ηλεκτρικού κλιβάνου είναι:

- 1) Η εξοικονόμηση ενέργειας.
- 2) Η μη μορφολογική επιβάρυνση του φυσικού τοπίου από την εξόρυξη φυσικών αδρανών.
- 3) Η θετική επίπτωση λόγω εξουδετέρωσης της όξινης αντίδρασης σε αντιδιαστολή με τα φυσικά αδρανή.
- 4) Η εξοικονόμηση φυσικών πόρων μέσω της ανακύκλωσης των παραπροϊόντων των χαλυβουργείων.
- 5) Η κατασκευή ασφαλέστερου οδικού δικτύου.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγική διαδικασία

Εξασφαλίζοντας χρήσεις για το σύνολο των παραγόμενων σκωριών, που μέχρι πρότινος θεωρούνταν παραπροϊόντα της χαλυβουργίας ελαττώνεται η ανάγκη για χρήση φυσικών πόρων. Επομένως δεν απαιτείται επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή πρώτων υλών με εξόρυξη φυσικών πετρωμάτων. Όσον αφορά την παραγωγική διαδικασία για την μετατροπή της πρώτης ύλης σε τελικά προϊόντα, απαιτεί την ίδια κατανάλωση ενέργειας με την αντίστοιχη διαδικασία στα λατομεία.

Χαρακτηριστικό της παραγωγικής διαδικασίας αποτελεί το γεγονός ότι δεν παράγονται νέα απόβλητα, αφού γίνεται εκμετάλλευση του συνόλου της παραγόμενης ποσότητας. Επίσης η επεξεργασία σε όλα τα στάδια γίνεται εν ξηρώ και οι εκπομπές στην ατμόσφαιρα είναι εντός των ορίων που έχει θέση η ευρωπαϊκή κοινότητα. Γενικά όλα τα στερεά προϊόντα της επεξεργασίας είναι εκμεταλλεύσιμα από την εταιρία, καθώς η επεξεργασία αποτελείται ουσιαστικά από θραύση και διαχωρισμό-διαβάθμιση των αδρανών.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρήση σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου ως αδρανές υλικό

Σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας και υλικών δεν υπάρχουν επίσημα συγκριτικά ποσοτικά στοιχεία για την κατανάλωση ενέργειας από τη χρήση φυσικών ή τεχνητών αδρανών για την κατασκευή αντιολισθητικών οδοστρωμάτων. Επίσης, δεν έχει αναφερθεί διαφορά στον τρόπο χρήσης τους ενώ κατά τη διάρκεια της κατασκευής του ασφαλτομίγματος και της οδοστρώσεως, δεν δημιουργούνται πρόσθετα απόβλητα από την χρήση αδρανών από σκωρία.

Καθώς τα αδρανή οδοποιίας χρησιμοποιούνται σε έργα που άπτονται άμεσα της δημόσιας υγείας, έχουν γίνει όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των αδρανών προέρχονται από τα φυσικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, δηλαδή της σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου, και δεν μεταβάλλονται κατά την παραγωγική διαδικασία ή μετά την ενσωμάτωση τους στους αντιολισθητικούς τάπητες των δρόμων.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε. έχει ως κύρια δραστηριότητα την ανακύκλωση των παραπροϊόντων των χαλυβουργιών του ομίλου ΣΙΔΕΝΟΡ. Κατά την τριετία 2002-2004 επεξεργάστηκε και διέθεσε προς πώληση περίπου το 90% της παραγόμενης από τα χαλυβουργεία ποσότητας ενώ ο στόχος για τα επόμενα χρόνια είναι το ποσοστό αυτό να σταθεροποιηθεί στα ίδια επίπεδα και τελικά να φτάσει το 100%. Για την υλοποίηση των στόχων πραγματοποιούνται εντός του τρέχοντος έτους επενδύσεις σε καινούριο μηχανολογικό εξοπλισμό για την παραγωγή νέων προϊόντων αυξημένης προστιθέμενης αξίας ενώ η συνεργασία με τα Α.Ε.Ι. αναμένεται να ενισχυθεί ακόμη περισσότερο. Η εταιρία βρίσκεται ήδη στη διαδικασία πιστοποίησης της, από διεθνείς φορείς πιστοποίησης διαχείρισης ποιότητας, κατά ISO 9001 και περιβαλλοντικής διαχείρισης ISO 14001. Μέσα στο 2005 αναμένεται η έγκριση της αίτησης σήμανσης CE κατά EN 13043 από τον ΕΛΟΤ. Με τους ελέγχους και τις πιστοποιήσεις αυτές θα επικυρωθεί η ποιότητα των προϊόντων, διεργασιών και μεθόδων της εταιρίας.

Τέλος στα πλαίσια της ευρύτερης ανάπτυξης της εταιρίας αναφέρεται ότι από στις αρχές του 2004 ολοκληρώθηκε η ίδρυση θυγατρικής στην Βουλγαρία για την εκμετάλλευση των παραπροϊόντων που προκύπτουν από την δραστηριότητα του Χαλυβουργείου STOMANA INDUSTRY S.A.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τσώχος Γ., Μουρατίδης Α., Σκείρ Γιούσεφ Α., Κεχαγιά Φ., Παντελίδης Λ., Λοΐζου Λ., Χρηστέλη Σ.: “Χρήση σκωριών χαλυβουργίας σε αντισισθηρούς τάπητες-Ενδιάμεση Έκθεση”, Εργαστήριο Οδοποιίας ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2004.
2. Πραπίδης Α., Ντούλης Γ., Ζωτιάδης Β., “Χρήση Σκωριών σε Αντισισθηρά Ασφαλτομίγματα βάσει Μηχανικών και Περιβαλλοντικών Κριτηρίων” Ινστιτούτο Ποιοτικού Ελέγχου, Εδαφομηχανική ΑΤΕ., Αθήνα.
3. Κεχαγιά Φ., “Χρήση Σκωριών Χαλυβουργίας σε Κατασκευές Οδοστρωμάτων”, Ημερίδα για τη χρήση βιομηχανικών Παραπροϊόντων στην Οδοποιία, 13/5/2004, Θεσσαλονίκη, σελ.102.
4. Papayianni I., Anastasiou E.: “Concrete Incorporating High Volume of Industrial By-products”, International Symposia: “Celebrating Concrete: People and Practice” proceedings, University of Dundee, Concrete Technology Unit, Dundee, Scotland, 3-4/9/2003, pp. 495-504.
5. Nijkerk A., Dalmijn W.: “Handbook of Recycling Techniques”, The Royal Library of the Hague Cataloguing-in-Publication Data, The Hague, Netherlands, February 2001, pp. 107-127.
6. ΕΥΔΕ/ΠΑΘΕ, “Αντισισθηρές Στρώσεις Κυκλοφορίας. Σχέδιο Τεχνικών Οδηγιών” Αθήνα, Ιούλιος 1999.

ΧΡΗΣΗ ΘΡΑΥΣΤΟΥ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΓΧΡΩΜΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΜΑΤΩΝ

Ι. Παπαγιάννη, Μ. Στεφανίδου, Β. Πάχτα

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η χρήση θραυστών κεραμικών υλικών ως αδρανών υλικών ή και του λεπτόκοκκου κλάσματος ως κονία είναι γνωστή από την αρχαιότητα, όπου υπάρχουν πολλές αναφορές για κονιάματα εξαιρετικής ανθεκτικότητας, κονιάματα με τη χρήση κεραμάλευρου και θραυστών κεραμικών. Βάσει αυτής της παράδοσης που έχει διαμορφώσει μια αισθητική αντίληψη στη χώρα μας, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αναβίωση της χρήσης θραυστού κεραμικού υλικού – που αποτελεί παραπροϊόν των κεραμοποιών– στην παραγωγή έγχρωμων σκυροδεμάτων για διαμόρφωση δαπέδων, καθώς και έγχρωμων κονιαμάτων για ανακαινίσεις μνημείων και ιστορικών κτιρίων, και για επιχρίσματα σύγχρονων κατασκευών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα κριτήρια καταλληλότητας που πρέπει να πληρούν τα κεραμικά υλικά για να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή ή ως κονία και δίνονται συνθέσεις και μηχανικά χαρακτηριστικά κονιαμάτων και ενεμάτων με αυτά τα υλικά.

Λέξεις κλειδιά: θραυστό κεραμικό υλικό, έγχρωμο κονίαμα, έγχρωμα ενέματα.

USE OF BRICK FRAGMENTS FOR THE PRODUCTION OF COLOURED MORTARS AND GROUTS

I Papayianni, M. Stefanidou, V. Pacht

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.

ABSTRACT: The use of crushed bricks as aggregates or the brick dust as binder in the structure of mortars is known since ancient times. There are many studies concerning the durable and high quality ancient mortars made with brick dust and crushed bricks. Based on this tradition, which has also an aesthetic result on the construction, these last years an effort has been made for the production of coloured concretes used in floors or pavements as well as for coloured mortars used for interventions in monuments and historical buildings and for plasters in modern constructions. In the present paper criteria for the brick fragments and brick dust, deriving as by-products from brick industries, are presented in order these materials to be used in compatible repair works.

Keywords: crushed brick fragments, coloured mortar, coloured grout.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα κονιάματα αποτελούν ένα από τα αρχαιότερα πολυφασικά τεχνητά δομικά υλικά και υπέστησαν με το χρόνο προσθήκες και τροποποιήσεις τόσο στις πρώτες ύλες όσο και στις μεθόδους κατεργασίας. Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη σύσταση των κονιαμάτων ήταν η άσβεστος, η ποζολάνη, το κεραμάλευρο (σε ορισμένες χρονικές περιόδους) και τα αδρανή υλικά που συνήθως είχαν φυσική προέλευση (ποτάμια) ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις (που συχνά σηματοδοτούν ιστορικές περιόδους) μέρος των φυσικών αδρανών αντικαταστάθηκε από θραυστά κεραμικά διαφόρων κοκκομετρικών διαβαθμίσεων (Εικόνα 1).

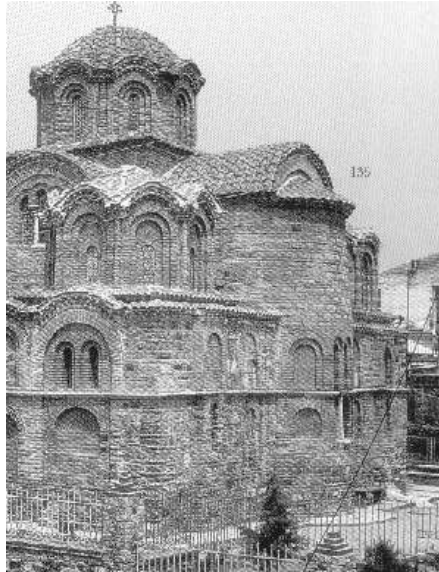
Τα κριτήρια για την επιλογή της πρώτης ύλης για τη σύνθεση κονιαμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή μνημείων και ιστορικών κτιρίων ήταν μάλλον βασισμένα στην εμπειρία. Η προσθήκη κεραμικού αποτέλεσε μια τεχνική βελτίωσης της ποιότητας των κονιαμάτων καθώς το χαμηλής έμψησης κεραμικό υλικό παρουσίαζε υδραυλικές ιδιότητες. Παρήχθησαν με αυτό τον τρόπο “κουρασάνια”, έγχρωμα κονιάματα με εξαιρετικές υδραυλικές και μονωτικές ιδιότητες που εφαρμόζονταν σε θέσεις όπου απαιτούνταν υδατοστεγανότητα ή ασκούσαν υψηλά φορτία προσθέτοντας ταυτόχρονα μια διαφορετική αισθητική στις κατασκευές.

Στα κονιάματα αυτών των ιστορικών περιόδων, τα θραυστά κεραμικά κλάσματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μέχρι 5cm και αντικαθιστούσαν φυσικά αδρανή σε ποσοστό 60-80% ενώ το κεραμάλευρο χρησιμοποιούνταν σε αναλογία με τον ασβέστη από 1:0.2 μέχρι 1:1 . Λόγω του χαμηλού ειδικού βάρους και της μεγαλύτερης τραχύτητας τα θραυστά κεραμικά αδρανή αποδίδουν ελαφρά κοκκοδέματα με πολύ καλή πρόσφυση με τη συνδετική κονία.

Σήμερα για την αποκατάσταση αυτών των κατασκευών απαιτείται η γνώση των παλαιών υλικών δόμησης ώστε να παραχθούν συμβατά υλικά που θα εξασφαλίσουν τη συνέχεια και σταθερότητα των μνημείων και των ιστορικών κτιρίων.



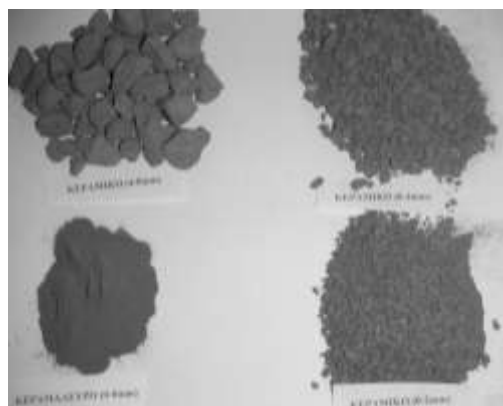
Εικόνα 1. Κεραμικά αδρανή σε κονίαμα από την Αγία Σοφία Θεσσαλονίκης (6^{ος} μ.Χ. αιώνας)



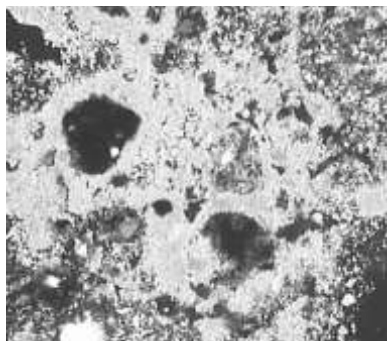
Εικόνα 2. Αγία Αικατερίνη 14^{ος} αιώνας

Δύο από τις πιο συνηθισμένες εργασίες αποκατάστασης αφορούν στην αρμολόγηση με κονιάματα αποκατάστασης και την πλήρωση-στερέωση ασυνεχειών και ρωγμών της δομής τους, με χρήση ενέσιμων υλικών. Τα υλικά αυτά, γνωστά ως ενέματα αφορούν σε λεπτόρευστα αναμίγματα κονιών ή και λεπτόκοκκων αδρανών με νερό, σε λόγο $N/K \geq 1$, που εισάγονται στην προς στερέωση δομή με ειδικά συστήματα (σε πίεση ≥ 1 Atm). Η μέθοδος αυτή αποτελεί συνήθη πρακτική όπως συμπεραίνεται, από το πλήθος των μνημείων στα οποία έχει ήδη εφαρμοστεί. Για να είναι επιτυχής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ανά περίπτωση, τα ειδικά χαρακτηριστικά της κάθε τοιχοποιίας (φυσικο-μηχανικά, χημικά χαρακτηριστικά επιμέρους υλικών κατασκευής, φέρουσα ικανότητα συστήματος) και να προτείνονται συμβατές συνθέσεις ενεμάτων.

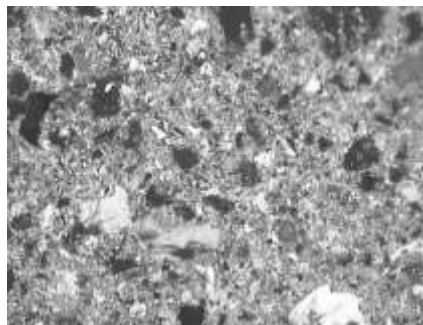
Οι πρώτες ύλες των συνθέσεων αυτών, καθώς και οι μεταξύ τους αναλογίες, προκύπτουν επομένως από τα ίδια τα υλικά κατασκευής των προς στερέωση δομών. Εν τούτοις για την παραγωγή τους χρησιμοποιούνται τα διαθέσιμα σήμερα θραυσμένα κεραμικά που είναι ψημένα σε υψηλές θερμοκρασίες (1000-1200°C). Αυτό στερεί από το κεραμικό υλικό σημαντικό μέρος της ποζολανικότητάς του και θέτει περιορισμούς στη χρήση του.



Εικόνα 3. Κεραμάλευρο και κλάσματα κεραμικών που χρησιμοποιήθηκαν σε συνθέσεις κονιαμάτων



Εικόνα 4^α. Ισχυρή συνάφεια
λεπτόκοκκου κεραμικού -κονίας
(Ρωμαϊκή Αγορά)
(Πολωτικό x130)



Εικόνα 4β. Λεπτόκοκκο κεραμικό ως
filler σε σύγχρονο κονίαμα
(Πολωτικό x130)

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για την παραγωγή έγχρωμων κονιαμάτων έγιναν εργαστηριακές συνθέσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονα κεραμικά υλικά (με τη μορφή πούδρας ή κλάσματα αδρανών, Εικόνα 3) για να παραχθούν κουρασάνια που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τα παλαιά κονιάματα.

Παρασκευάστηκε μια σειρά κονιαμάτων στην οποία αντικαταστάθηκε μέρος του τσιμέντου από κεραμάλευρο σε διάφορα ποσοστά καθώς και μια σειρά κονιαμάτων με θραυστά κεραμικά ως αδρανή που αντικατέστησαν μέρος των φυσικών αδρανών όπως φαίνεται στους Πίνακες 1 και 2. Μελετήθηκαν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων (Πίνακες 3 και 4) καθώς και η επίδραση των κεραμικών στη μικροδομή των κονιαμάτων (Εικόνα 4).

Πίνακας 1. Συνθέσεις νέων κονιαμάτων με θραυστά
κεραμικά υλικά ως αδρανή (σε μέρη βάρους)

	Ασβέστης	Ποζολάνη	Φυσικά Αδρανή		Κεραμικά αδρανή		N/K
			0-4 mm	0-8 mm	0-4 mm	0-8 mm	
1	1	1		2			0,5
2	1	1		1,5		0,5	0,6
3	1	1	2				0,5
4	1	1	1,5		0,5		0,55
5	1			1			0,67
6	1		0,4		0,6		0,74

Πίνακας 2. Συνθέσεις νέων κονιαμάτων με κεραμάλευρο

	Ασβέστης	Ποζολάνη	Τσιμέντο	Κεραμάλευρο	Άμμος	N/K
1	1	0,5		0,5	5	0,75
2	1	0,4	0,2	0,4	5	0,67
3	1	0,3	0,4	0,3	5	0,67
4	1	0,3	0,5	0,2	5	0,66
5	1	0,5	0,5	-	5	0,65

Πίνακας 3. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά
κονιαμάτων με θραυστά κεραμικά ηλικίας 3 μηνών

	Αντοχή σε θλίψη MPa	Αντοχή σε κάμψη MPa	Πορώδες	Ειδ. βάρος
1	7,1	1,1	26,2	1,625
2	9,26	1,3	28,1	1,628
3	10,2	2,08	25,1	1,646
4	11,0	2,26	29,3	1,623
5	1,71	0,6	20,95	1,653
6	2,23	0,87	23,65	1,625

Όσον αφορά στη χρήση κεραμάλευρου ως μέρους κονίας παρασκευάστηκαν τρεις σειρές ενεμάτων. Τα συστήματα κονιών, που αποτελούν τη βάση τους είναι η υδράσβεστος (σε μορφή σκόνης), η ποζολάνη (αλεσμένη, με συγκρατούμενο στο κόσκινο 45 μ m 10%), το λευκό τσιμέντο και τέλος το κεραμάλευρο (με μέγεθος κόκκου ≤ 25 mm). Οι μεταξύ τους αναλογίες τροποποιούνται ανάλογα ανά σειρά ενέματος, προκειμένου να διαπιστωθούν οι διαφοροποιήσεις των φυσικο-μηχανικών χαρακτηριστικών τους. Οι επιμέρους συνθέσεις των ενεμάτων δίδονται συνοπτικά στον πίνακα 5.

Η πρώτη σειρά με κωδικό αριθμό, 1.1, 1.2, 1.3 αποτελείται από υδράσβεστο, ποζολάνη και λευκό τσιμέντο σε διαφορετικές αναλογίες και παρουσιάζεται ως μέσο αναφοράς για τη σύγκριση των λοιπών ενεμάτων με παρουσία κεραμάλευρου (2, 3). Η αναλογία υδράσβεστου/ποζολάνης είναι 1/1, ενώ προστίθεται ποσότητα λευκού τσιμέντου σε αναλογία 0,2 και 0,3. Στη δεύτερη σειρά (συνθέσεις 2.1, 2.2, 2.3) το 40% της ποζολάνης αντικαθίσταται από κεραμάλευρο, ενώ αντίστοιχα στην τρίτη σειρά (3.1, 3.2, 3.3) αντικαθίσταται το 50% της ποζολάνης. Σε όλες τις περιπτώσεις προστίθεται ρευστοποιητής πολυκαρβονικής βάσης και απαλλαγμένος αλάτων, σε ποσοστό 1% κ.β. κονιών.

Για τη διαδικασία παρασκευής των ενεμάτων, ακολουθήθηκαν οι σύγχρονες προδιαγραφές. Τα αναμίγματα παρασκευάστηκαν σε πολύτροφο αναμικτήρα, ώστε να επιτευχθεί ομογενοποίησή τους και να αποφευχθεί το φαινόμενο της απόμειξης των συστατικών. Προκειμένου να διαπιστωθεί η απαιτούμενη ποσότητα νερού μετρήθηκε η ρευστότητα των μιγμάτων με τον κώνο Marsh (σύμφωνα με τις προδιαγραφές, ο ενδεδειγμένος χρόνος διέλευσης του μίγματος από τον κώνο ήταν 9 ± 1 sec). Στη συνέχεια, προκειμένου να διαπιστωθεί η ικανότητα διεύθυνσης του υλικού μετρήθηκε ο χρόνος διέλευσης του από τη στήλη άμμου, μέσω της εν λόγω μεθόδου. Τέλος, μετρήθηκε η σταθερότητα όγκου των μιγμάτων, μέσω της κάθισης τους σε 24 ώρες από την παρασκευή. Όλα τα αποτελέσματα των ελέγχων σε νωπή κατάσταση των αναμιγμάτων δίδονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 4. Φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά
κονιαμάτων με κεραμάλευρο ηλικίας 3 μηνών

	Αντοχή σε θλίψη MPa	Αντοχή σε κάμψη MPa	Πορώδες	Ειδ. βάρος
1	1,66	0,72	19,2	1,716
2	2,4	0,65	18,1	1,744
3	4,3	0,76	18,94	1,718
4	4,66	1,18	18,12	1,752
5	6,60	1,11	17,67	1,782

Πίνακας 5. Αναλογίες συνθέσεων αναμιγμάτων ενεμάτων.
Αποτελέσματα ελέγχων σε νωπή κατάσταση

Κωδ. Σύνθ.	Πρώτες Ύλες	Μέρη Βάρους	Λόγος N/K	Ρευστότητα (s)	Διεισδυ- τικότητα (sec)	Σταθ. Όγκου (%)
1.1	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 1.00	1.10	9,80	4,80	3%
1.2	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Λευκό τσιμέντο Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 1.00 0.20	1.00	9,34	3,10	2%
1.3	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Λευκό τσιμέντο Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 1.00 0.30	0.97	9,70	8,10	0
2.1	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Κεραμάλευρο (<0,25mm) Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 0.60 0.40	0.93	9,59	2,10	5%
2.2	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Κεραμάλευρο (<0,25mm) Λευκό τσιμέντο Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 0.60 0.40 0.20	0.90	10,20	2,95	0
2.3	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Κεραμάλευρο (<0,25mm) Λευκό τσιμέντο Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 0.60 0.40 0.30	0.98	9,90	2,67	1%
3.1	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Κεραμάλευρο (<0,25mm) Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 0.50 0.50	1.00	9,90	3,80	5%
3.2	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Κεραμάλευρο (<0,25mm) Λευκό τσιμέντο Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 0.50 0.50 0.20	0.96	10,15	3,20	1%
3.3	Υδράσβεστος Πουζολάνη αλεσμένη Κεραμάλευρο (<0,25mm) Λευκό τσιμέντο Ρευστοποιητής 1% κ.β. κονιών	1.00 0.50 0.50 0.30	0.93	9,60	4,20	1%

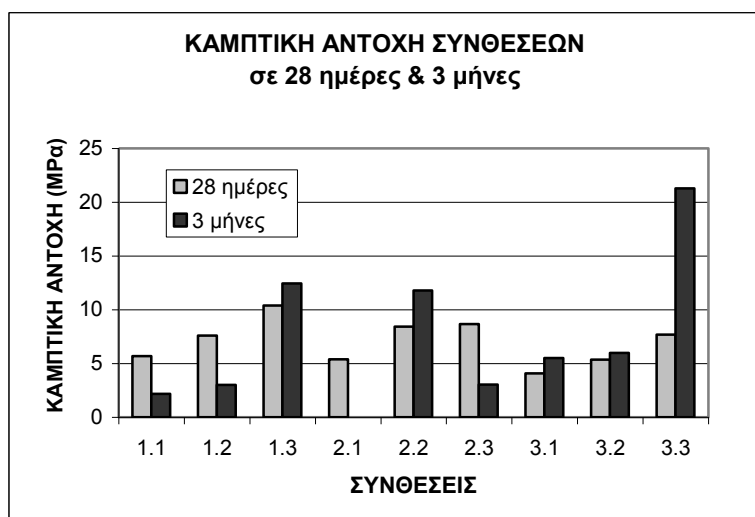
Πίνακας 6. Μηχανικά χαρακτηριστικά συνθέσεων (28 ημέρες – 3 μήνες)

Κωδ. Αρ. Σύνθεσης	28 ημέρες			3 μήνες		
	Δυν. Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Καμπτική αντοχή (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)	Δυν. Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Καμπτική αντοχή (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)
1.1	38,12	0.56	0.89	-	0.21	4.497
1.2	22,82	0.76	1.07	31,76	0.30	4.798
1.3	33,26	1.04	2.51	45,49	1.24	5.385
2.1	21,94	0.54	0.82	17,75	-	3.326
2.2	24,52	0.84	1.72	27,74	1.18	4.745
2.3	25,05	0.86	1.75	32,36	0.30	4.272
3.1	10,36	0.40	0.88	18,96	0.55	4.158
3.2	16,54	0.54	1.46	17,49	0.59	3.061
3.3	21,66	0.77	1.84	27,19	2.13	5.046

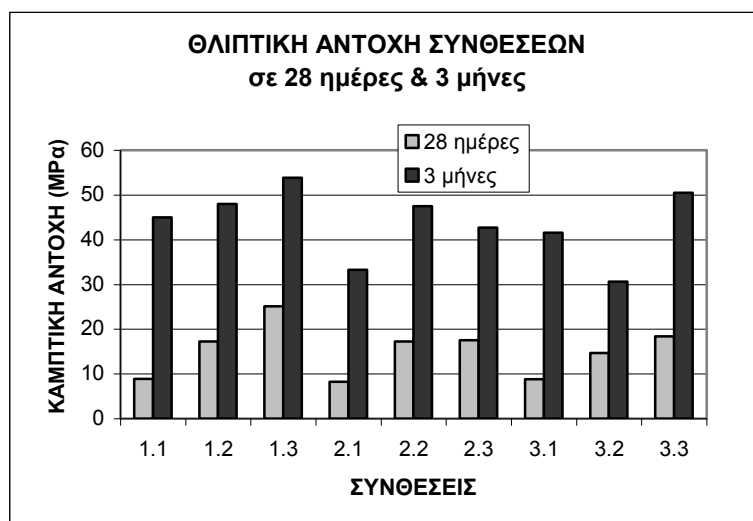
Ο έλεγχος των φυσικο-μηχανικών χαρακτηριστικών όλων των συνθέσεων πραγματοποιήθηκε 28 ημέρες και 3 μήνες από την παρασκευή τους. Όλα τα αποτελέσματα των ελέγχων (προσδιορισμός Δυναμικού Μέρους Ελαστικότητας, μηχανικής αντοχής σε κάμψη και θλίψη) δίδονται στον πίνακα 6, καθώς και στα διαγράμματα 1 και 2.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Όσον αφορά στη χρήση θραυστών κεραμικών ως αδρανή στη σύνθεση των κονιαμάτων (συνθέσεις 1-6) παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής 10-30% με αντικατάσταση μέρους των φυσικών αδρανών με κεραμικά. Αυτό σημαίνει ότι η πρόσφυση των κεραμικών αδρανών με την κονία είναι ισχυρή. Η ταυτόχρονη αύξηση του ενεργού πορώδους στις συνθέσεις αυτές εξηγείται από το γεγονός ότι τα κεραμικά απορροφούν περισσότερο νερό από τα φυσικά αδρανή λόγω της φύσης τους. Επίσης παρατηρείται μικρή αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας νερού για την επίτευξη σταθερής εργασιμότητας, παράγοντας που θα μπορούσε να μειωθεί με τη χρήση ρευστοποιητών.



Διάγραμμα 1. Αποτελέσματα καμπτικής αντοχής συνθέσεων ενεμάτων σε 28ημέρες και 3 μήνες από την παρασκευή



Διάγραμμα 2. Αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής συνθέσεων
ενεμάτων σε 28ημέρες και 3 μήνες από την παρασκευή

Στις συνθέσεις με χρήση κεραμάλευρου παρατηρείται ότι οι συνθέσεις με υψηλό ποσοστό τσιμέντου (0,5) έχουν τις υψηλότερες αντοχές όπως αναμενόταν (συνθέσεις 4 και 5, πίνακας 2). Αντικατάσταση μέρους της ποζολάνης με κεραμάλευρο μειώνει την αντοχή (40%) γεγονός που δηλώνει ότι το κεραμάλευρο δεν έχει ισχυρό υδραυλικό χαρακτήρα. Η προσθήκη του πάντως σε ποσοστό 0,2-0,3 δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στα μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά (συνθέσεις 4 και 5) ενώ επηρεάζει τη απόχρωση του υλικού. Περαιτέρω προσθήκη κεραμάλευρου (0,4 -0,5) μειώνει αισθητά τις αντοχές και αυξάνει την απαιτούμενη ποσότητα νερού για την εργασιμότητα.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των φυσικο-μηχανικών ελέγχων των ενεμάτων, μέσω των διαγραμμάτων 1 και 2, προέκυψαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

1. Η αντικατάσταση μέρους της ποζολάνης από κεραμάλευρο (40% στη σειρά 2 και 50% στη σειρά 3), οδηγεί σε μείωση του χρόνου διεισδυτικότητας κατά ένα ποσοστό της τάξης του 10-20%.
2. Η αντικατάσταση μέρους της ποζολάνης από κεραμάλευρο (40% στη σειρά 2 και 50% στη σειρά 3), δεν οδηγεί σε μεγάλη μείωση της μηχανικής αντοχής, παρά μόνο σε ένα ποσοστό της τάξης του 10-25%.
3. Μεγαλύτερη μείωση στην αντοχή (15-25%) παρατηρείται για τη σειρά 3, που ωστόσο, διατηρεί στους 3 μήνες μεγαλύτερη κανονικότητα στις τιμές (αυξανόμενης της περιεκτικότητας σε λευκό τσιμέντο, αυξάνεται και η μηχανική αντοχή).
4. Η σύνθεση με την καλύτερη συμπεριφορά τόσο στις 28 ημέρες όσο και στους τρεις μήνες, όπως προέκυψε πειραματικά ήταν αυτή με κωδ. αρ. 3.3. Είναι χαρακτηριστικό ότι η καμπτική αντοχή της στους 3 μήνες ξεπερνά κατά το διπλάσιο την τιμή της αντίστοιχης χωρίς κεραμάλευρο σύνθεσης (1.3), ενώ η θλιπτική αντοχή είναι σχεδόν ίση με αυτή του 1.3.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το θραυστό κεραμικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αδρανές υλικό και συνδυάζεται με όλες τις κονίες υδρασβεστο, ποζολάνη, λευκό τσιμέντο. Τα κονιάματα που προκύπτουν έχουν μικρότερο φαινόμενο ειδικό βάρος και πλεονεκτούν ως προς τη συνάφεια με το πηγμα. Η κοκκομετρία τους πρέπει να ελέγχεται για να εμπίπτει στην καλή περιοχή. Είναι επίσης σημαντικό να ελέγχεται η ανθεκτικότητά τους σε κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης. Τα κονιοδέματα έχουν χαρακτηριστική κοκκινωπή χροιά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτός από τις επεμβάσεις ιστορικών κτιρίων και σε επικαλύψεις σύγχρονων τοιχοποιιών.
- Το κονιοποιημένο σύγχρονο κεραμικό υλικό (κεραμάλευρο) λειτουργεί περισσότερο ως filler παρά ως ποζολανικό υλικό. Έτσι σε συστήματα υδρασβέστου-κεραμάλευρου η αντοχή που αναπτύσσεται είναι μειωμένη ενώ σε συστήματα υδρασβέστου- ποζολάνης ή υδρασβέστου-τσιμέντου-ποζολάνης το κεραμάλευρο ως filler επιφέρει μια αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Το ποσοστό προσθήκης δεν πρέπει να ξεπερνά το 10-15%κ. β της κονίας κυρίως για λόγους αύξησης του απαιτούμενου νερού ανάμιξης και των συνεπειών που μπορεί να έχει στην ανθεκτικότητα των κονιαμάτων.
- Στην περίπτωση της χρήσης κεραμάλευρου για παραγωγή ενεμάτων που χρησιμοποιούνται για στερεώσεις μνημείων βυζαντινής αρχιτεκτονικής το υλικό φαίνεται να συνδυάζεται καλά με συστήματα υδρασβέστου-ποζολάνης –τσιμέντου όπου αυξάνει τη διεισδυτικότητα και βελτιώνει τη σταθερότητα όγκου πιθανόν λόγω της μεγαλύτερης συγκρατισιμότητας νερού που παρουσιάζουν οι κόκκοι του κεραμάλευρου.

Γενικά μπορεί να λεχθεί ότι το κεραμικό υλικό που αποτελεί παραπροϊόν (φύρα) στις κεραμοποιίες μπορεί να αξιοποιηθεί επωφελώς στις επεμβάσεις σε μνημεία, σε επικαλύψεις σύγχρονων τοιχοποιιών (κονιάματα επιχρίσεων) ακόμη και σε έγχρωμο διακοσμητικό σκυρόδεμα είτε ως θραυστό κεραμικό αδρανές είτε ως πληρωτικό υλικό.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Baronio G., Binda L., Lombardini N. “ The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks” Construction and Building Materials Vol.11, No 1 pp.33-40 1997 Elsevier science Ltd.
- [2] Livingston R.A. “Material analysis of the masonry of the Hagia Sophia basilica, istanbul” by structural repair and maintenance of historical buildings p.p.16-28
- [3] Papayianni I. “A diachronic Principle in Construction: The use of Mixed Type Binders: Durability Aspects” J. G Cabrera Symposium on Durability of Concrete Materials, 1998. Editor R.N. Swamy pp. 115-130
- [4] Penelis G., Papayianni I., “Grouts for Repairing and Strengthening Old Masonry Structures”, First Inter. Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings, STREMA, Florence, Italy, 1989, pp. 179-188.
- [5] Karaverizoglou M., Papayianni I., Penelis G., “Mortars and Grouts in Restoration of Roman and Byzantine Monuments”, European Seminar on Ancient traditional mortar technology and their importance in conservation projects, Rethymnon, Crete, March 1995, pp. 1-30.

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΥΨΟΥ ΑΠΟ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ

Γ. Τζουβαλάς¹, Ε. Χανιωτάκης², Ν. Δερματάς¹, Γ. Ράντης¹, Σ. Τσίμας¹

¹*Εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων
Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου Αθήνα*

²*TITAN A.E., Διεύθυνση Έρευνας και Ποιότητας*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η ορυκτή γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) αποτελεί το βασικό ρυθμιστή του χρόνου πήξης του τσιμέντου. Ωστόσο, τόσο η ελληνική όσο και η διεθνής πραγματικότητα δημιουργεί την ανάγκη για εύρεση εναλλακτικών πρώτων υλών για τη ρύθμιση του χρόνου πήξης. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα διεξοδικής έρευνας για την πιθανή υποκατάσταση της γύψου από τους ακόλουθους εναλλακτικούς φορείς θειικού ασβεστίου, οι οποίοι προκύπτουν ως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών: α) γύψος από αποθείωση απερίων (FGD), β) φωσφογύψος ως παραπροϊόν της βιομηχανίας λιπασμάτων. Η μελέτη περιλαμβάνει την παρασκευή τσιμέντων τύπου CEM I και σκυροδεμάτων C20/25 σε εργαστηριακή κλίμακα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι δυνατή η μερική ή ολική υποκατάσταση της φυσικής γύψου από βιομηχανικά παραπροϊόντα - φορείς θειικού ασβεστίου, χωρίς να αλλοιώνεται η ποιότητα του τσιμέντου.

Λέξεις κλειδιά: ορυκτή γύψος, FGD, φωσφογύψος, θειικό ασβέστιο, πήξη τσιμέντου

POSSIBILITY OF GYPSUM DISPLACEMENT BY INDUSTRIAL BYPRODUCTS

G. Tzouvalas¹, E. Chaniotakis², N. Dermatas¹, G. Rantis¹, S. Tsimas¹

¹*Laboratory of Inorganic and Analytical Chemistry, School of Chemical Engineers NTUA, 9 Iroon Polytechniou str, 157 73, Athens*

²*TITAN Cement Company S.A., R&D and Quality Department*

ABSTRACT: Mining natural gypsum (dihydrate of calcium sulfate – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is used almost exclusively as cement setting retarder. Nevertheless the necessity for the exploitation of alternative cement setting retarders becomes globally more and more a need. In the present work the results of an extent research for the possible displacement of gypsum with alternative calcium sulfate bearing materials which are industrial by-products are briefly presented. These materials are: a) FGD gypsum from flue gas desulphurisation process, b) phosphogypsum, a byproduct of fertilizer industry. The study contents the production of cement type I (CEM I) and concrete of C20/25 category in laboratory scale. The results conclude to the fact that the partial or total displacement of natural gypsum by industrial byproducts - calcium sulfate bearing materials is possible without any deterioration on cement quality.

Keywords: natural gypsum, FGD, phosphogypsum, calcium sulfate, cement setting

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση της ορυκτής γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) στην τσιμεντοβιομηχανία σχετίζεται με την επιβράδυνση της ενυδάτωσης του C_3A , ορυκτολογικής φάσης του κλίνκερ (τσιμέντο Portland). Η προσθήκη της μπορεί να γίνει με τη διυδρική ή ανυδριτική μορφή (φυσικός ανυδρίτης) και σε αναλογία, κατά μέσο όρο, 5%. Ωστόσο, τόσο η ελληνική όσο και η διεθνής πραγματικότητα (εξάντληση φυσικών αποθεμάτων, αξιοποίηση βιομηχανικών παραπροϊόντων) δημιουργεί την ανάγκη για εύρεση εναλλακτικών πρώτων υλών για τη ρύθμιση του χρόνου πήξης. [1, 2, 3]

Σε παγκόσμιο επίπεδο γίνονται προσπάθειες ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόρριψη υλικών που γενικότερα χαρακτηρίζονται ως βιομηχανικά παραπροϊόντα. Μία σημαντική πτυχή αυτής της ελαχιστοποίησης των απορριπτόμενων υλικών είναι η περαιτέρω διερεύνηση της δυνατότητας χρησιμοποίησης τους ως πρώτων υλών άλλων βιομηχανικών δραστηριοτήτων, με την ενσωμάτωσή τους σε κάποιο σημείο της παραγωγικής της διαδικασίας. Έτσι αυτά δεν αποτελούν απορρίμματα ή άχρηστα υλικά, αλλά αξιοποιήσιμα υλικά. Δύο βασικές πηγές γύψου που αποτελούν βιομηχανικά παραπροϊόντα στον ελληνικό χώρο είναι το FGD και η φωσφογύψος [4, 5, 6, 7].

Το FGD (Flue Gas Desulphurisation) είναι γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) που προέρχεται από τη δέσμευση, με ασβεστόλιθο του μεγαλύτερου μέρους των εκπομπών SO_2 (>95%) στο περιβάλλον. Έτσι εξασφαλίζεται η προστασία του περιβάλλοντος από εκπομπές SO_2 και η ελαχιστοποίηση των συνεπειών που συνεπάγεται κάτι τέτοιο (όξινη βροχή κλπ.) τόσο στο περιβάλλον όσο και στη δημόσια υγεία. Οι FGD μέθοδοι με ενώσεις του ασβεστίου μπορούν να συνδυαστούν άριστα με μονάδες (θερμοηλεκτρικά εργοστάσια) που περιλαμβάνουν καύση άνθρακα, δηλαδή λιγνίτη με υψηλή περιεκτικότητα σε S. Η ΔΕΗ στις προσπάθειές της για ένα καθαρότερο περιβάλλον, έχει μελετήσει και εφαρμόσει ένα σύστημα συναπόθεσης της Ιπτάμενης Τέφρας του ΑΗΣ Β της Μεγαλόπολης με το FGD που παράγεται στον ίδιο σταθμό, επιτυγχάνοντας την ασφαλή τους απόθεση. Η ετήσια παραγωγή FGD ανέρχεται περίπου σε 800.000 τόνους, στους οποίους τα περιεχόμενα στερεά είναι της τάξης του 50 - 55%. Η παραγωγή αυτή έχει πλέον αυξηθεί κατά πολύ με την πλήρη λειτουργία της νέας μονάδας στη Φλώρινα, η ετήσια παραγωγή της οποίας ανέρχεται περίπου σε 300.000 τόνους με περιεχόμενα στερεά 90%. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλη η παραγόμενη ποσότητα FGD, προς το παρόν παραμένει αναξιοποίητη και αποτίθεται στο περιβάλλον σε συγκεκριμένα πεδία απόθεσης κοντά στα εργοστάσια της ΔΕΗ, προκαλώντας τόσο περιβαλλοντικό όσο και οικονομικό κόστος [8, 9].

Η φωσφογύψος, που αποτελεί μια ακόμη διυδρική μορφή γύψου, είναι ένα παραπροϊόν της βιομηχανίας φωσφορικών λιπασμάτων και προκύπτει από την παραγωγική διαδικασία του φωσφορικού οξέος (υγρή μέθοδος). Η χημική αντίδραση περιλαμβάνει σχηματισμό φωσφορικού οξέος από το φυσικό φωσφορικό ασβέστιο $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (φωσφορίτης) με επίδραση πυκνού θεικού οξέος 90-98%: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_3\text{PO}_4 + 3(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$. Η φωσφογύψος αποτελείται από στρώματα μονοκλινών αλληλοεμπλεκόμενων κρυστάλλων και ορυκτολογικά είναι πανομοιότυπη με την ορυκτή γύψο. Η μέση διάμετρος των κόκκων της κυμαίνεται μεταξύ 60 – 70 μm με το 90% να είναι μικρότερο από τα 250 μm . Παρ' όλα αυτά, η ύπαρξη σημαντικών προσμίξεων στη φωσφογύψο επηρεάζει σημαντικά την ενυδάτωση του τσιμέντου Portland. Αυτές είναι: το υποκατεστημένο P_2O_5 στο κρυσταλλικό πλέγμα της γύψου, το διαλυτό στο νερό P_2O_5 και το διαλυτό στο νερό F που έχει προσκολληθεί στην επιφάνεια των κρυστάλλων της γύψου. Αυτές οι προσμίξεις που αντικαθιστούν στο κρυσταλλικό πλέγμα τα θειικά ιόντα (SO_4^{2-}), αυξάνουν το χρόνο πήξης (για άλλες εφαρμογές θετικό, για άλλες αρνητικό), μειώνουν τις πρώιμες κυρίως αντοχές, έτσι ώστε η φωσφογύψος να μην ενδείκνυται πάντα για τη ρύθμιση του χρόνου πήξης στο τσιμέντο Portland [6, 10, 11]. Στην Ελλάδα φωσφογύψος παράγεται στη Μακεδονία από τη βιομηχανία φωσφορικών λιπασμάτων (ΒΙΦΛ) και η ετήσια παραγωγή ανέρχεται σε 300.000 τόνους [3].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η χημική ανάλυση (ASTM C 471M – 95) και η διαλυτότητα των φορέων θειικού ασβεστίου (ορυκτή γύψος, φωσφογύψος, FGD) παρατίθεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση φορέων θειικού ασβεστίου

	Χημικώς Ενωμένο H ₂ O	SO ₃	SiO ₂	CO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	MgO	Διαλυτότητα (g/100g H ₂ O)
Γύψος	19,3	43,4	0,65	2,51	32,4	0,03	0,92	0,260
Φωσφογύψος	19,8	43,8	1,44	1,00	31,8	1,02	0,05	0,235
FGD	18,05	42,2	1,30	1,58	33,4	0,10	0,10	0,273

Παρασκευή τσιμέντων Τύπου CEM I από συναλέσεις κλίνκερ με φορείς CaSO₄

Μετά από μία αρχική σειρά συναλέσεων κλίνκερ με κάθε φορέα θειικού ασβεστίου ξεχωριστά, διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη προσθήκη %SO₃ ήταν γύρω στο 3,5% [2]. Με βάση αυτό το συμπέρασμα σχεδιάστηκε μια νέα φάση συναλέσεων, όπου αυτή τη φορά το κλίνκερ συναλέστηκε με μίγματα πρώτων υλών. Τα μίγματα των πρώτων υλών που συναλέστηκαν με το κλίνκερ ήταν: ι) γύψος - φωσφογύψος, και ιι) γύψος - FGD, σε ποσοστά 40/60, 50/50, 60/40, 70/30 αντίστοιχα. Οι ονομασίες τους είναι σχετικές με το μίγμα φορέων που συναλέστηκε με το κλίνκερ (Γ-γύψος, F-FGD, Φ-φωσφογύψος). Στα τσιμέντα που προέκυψαν μετρήθηκαν οι χρόνοι πήξης και οι θλιπτικές αντοχές 1, 2, 7 και 28 ημερών.

Πίνακας 2. Συνάλεση κλίνκερ με μίγματα γύψου – φωσφογύψου (ΓΦ)

	Φ	ΓΦ1	ΓΦ2	ΓΦ3	ΓΦ4	Γ
% Κλίνκερ	93,5	93,41	93,4	93,40	93,40	93,5
% Μίγματος γύψου – φωσφογύψου	6,5	6,59	6,6	6,60	6,60	6,5
% Γύψου / Φωσφογύψου	0/100	40/60	50/50	60/40	70/30	100/0
% SO ₃ τσιμέντου	3,65	3,37	3,51	3,42	3,39	3,54
Ειδική επιφάνεια - Blaine (cm ² /g)	4030	3950	3850	3850	3800	3800

Πίνακας 3. Συνάλεση κλίνκερ με μίγματα γύψου - FGD (ΓF)

	F	ΓF1	ΓF2	ΓF3	ΓF4	Γ
% Κλίνκερ	93,5	93,26	93,28	93,30	93,32	93,5
% Μίγματος γύψου – FGD	6,5	6,74	6,72	6,70	6,68	6,5
% Γύψου / FGD	0/100	40/60	50/50	60/40	70/30	100/0
% SO ₃ τσιμέντου	3,47	3,55	3,58	3,55	3,49	3,54
Ειδική επιφάνεια - Blaine (cm ² /g)	3970	3850	3850	3800	3750	3800

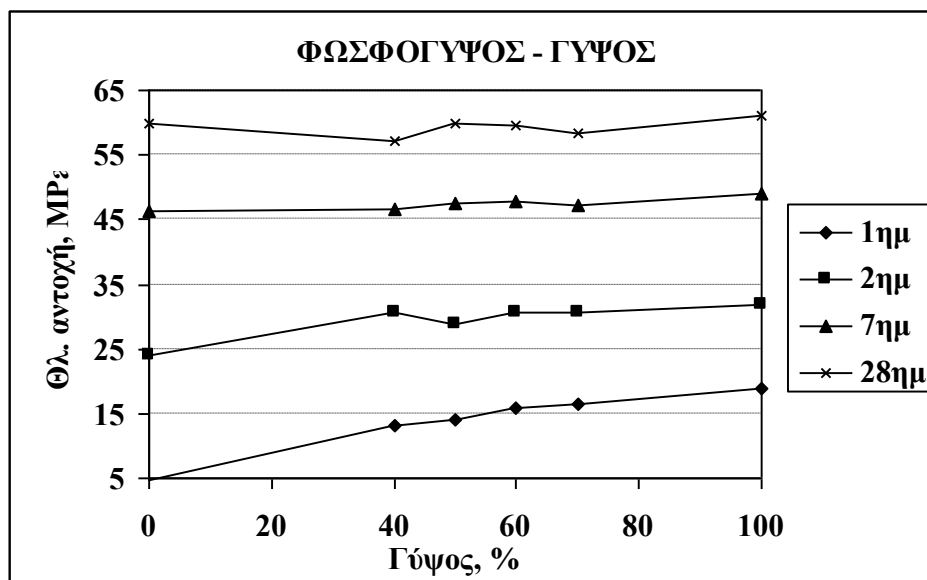
Παρασκευή σκυροδεμάτων από τσιμέντα με εναλλακτικούς φορείς θειικού ασβεστίου

Απώτερος στόχος κάθε δράσης που πραγματοποιείται στην τσιμεντοβιομηχανία είναι να παραχθεί σκυρόδεμα καλής ποιότητας, το οποίο είναι το βασικό και ευρύτατα χρησιμοποιούμενο δομικό υλικό. Για το λόγο αυτό η πειραματική διαδικασία επεκτάθηκε στην παραγωγή σκυροδέματος από τσιμέντα με διάφορους φορείς – ρυθμιστές πήξης και στην εξέταση βασικών φυσικών και μηχανικών του ιδιοτήτων. Παρασκευάστηκαν εκ νέου τσιμέντα με διάφορα ποσοστά και συνδυασμούς του κλίνκερ (94, 95, 96%) και των φορέων CaSO_4 (6, 5, 4%). Στόχος ήταν η % προσθήκη SO_3 να κυμαίνεται περί το 3,5% και η ειδική επιφάνεια (Blaine) να είναι 3700-3800 cm^2/g . Στη συνέχεια παρασκευάστηκαν συνθέσεις σκυροδέματος κατηγορίας C20/25 με κάθιση 9-10 cm. Ο λόγος νερού / τσιμέντο διατηρήθηκε σταθερός και ίσος με 0.68 σε όλες τις συνθέσεις. Στα παραχθέντα σκυροδέματα μετρήθηκαν η κάθιση, οι θλιπτικές αντοχές 2, 7, 28 και 90 ημερών σε κυβικά δοκίμια 15cm, τα οποία διατηρούνταν σε ειδικούς θαλάμους συντήρησης (20°C, υγρασία RH 100%). Ακολούθησε προσδιορισμός του πορώδους σύμφωνα με την πρότυπη μέθοδο ASTM C642 “Standard test method for specific gravity, absorption and voids in hardened concrete”. Η αξιολόγηση των σκυροδεμάτων ολοκληρώθηκε με δοκιμή ανθεκτικότητας σε προσβολή θεικών (sulfate attack) ως εξής: στην ηλικία των 40 ημερών ένα κυλινδρικό δοκίμιο ύψους 20cm και διαμέτρου 10cm εμβαπτίστηκε σε διάλυμα H_2SO_4 3%, και ένα άλλο σε κορεσμένο διάλυμα $\text{Ca}(\text{OH})_2$, αφού πρώτα ζυγίστηκαν τα αρχικά τους βάρη. Το δοκίμιο στο $\text{Ca}(\text{OH})_2$ αποτελούσε το μέτρο σύγκρισης. Ύστερα από 50 ημέρες παραμονής στα διαλύματα έγινε οπτική παρατήρηση της διάβρωσης που είχε επέλθει, ζύγιση και μέτρηση της θλιπτικής τους αντοχής.

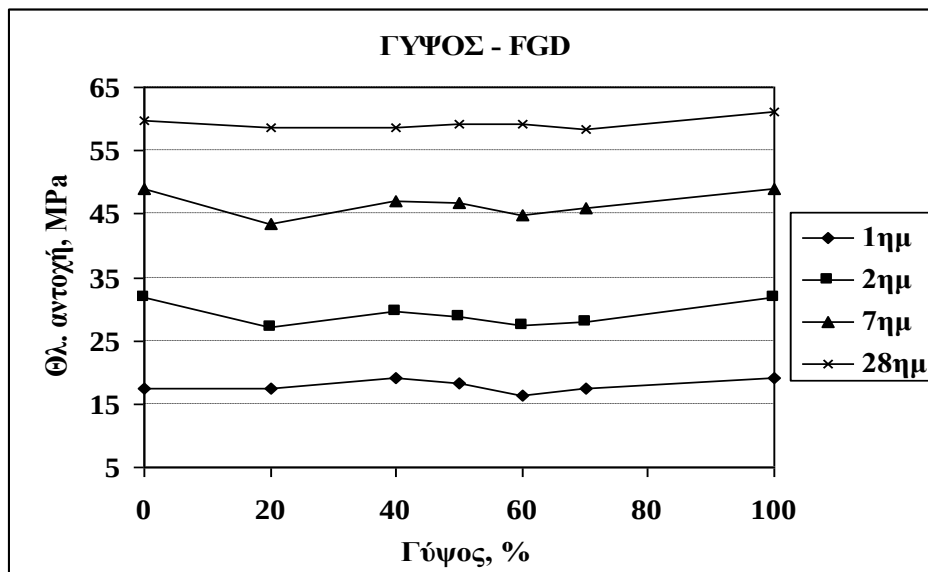
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

Εργαστηριακά τσιμέντα

Οι θλιπτικές αντοχές για τις ηλικίες 1, 2, 7, 28 ημερών των τσιμέντων με μίγματα φορέων παρουσιάζονται στα διαγράμματα 1-2. Οι αντοχές 28 ημερών των τσιμέντων με γύψο-FGD παρουσιάζουν ελάχιστο στη σύνθεση με μίγμα γύψων αναλογίας 50/50. Αντίθετη συμπεριφορά παρουσιάζει το τσιμέντο με γύψο-φωσφογύψο, δίνοντας μέγιστη αντοχή στο μίγμα αναλογίας μεταξύ 50/50 και 60/40.



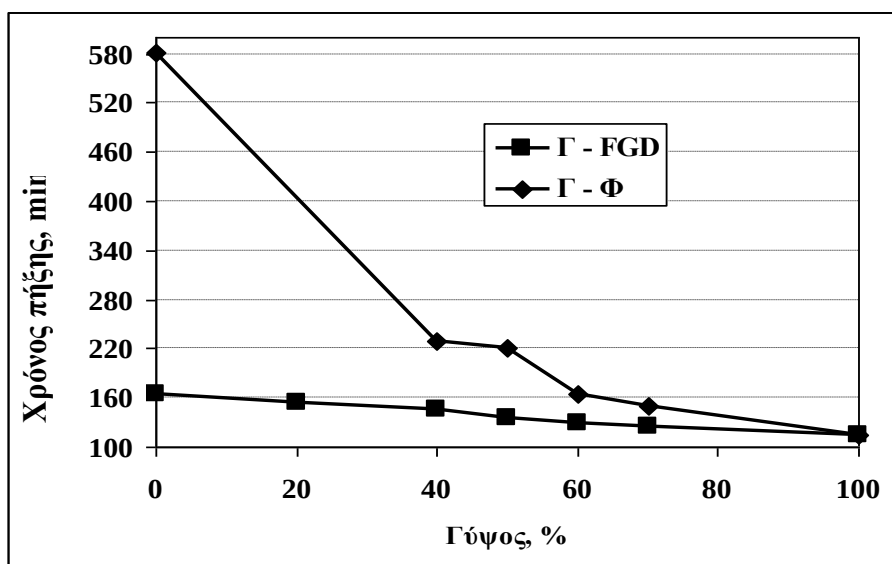
Διάγραμμα 1. Εξέλιξη αντοχών τσιμέντων με διάφορα ποσοστά μίγματος γύψου-φωσφογύψου



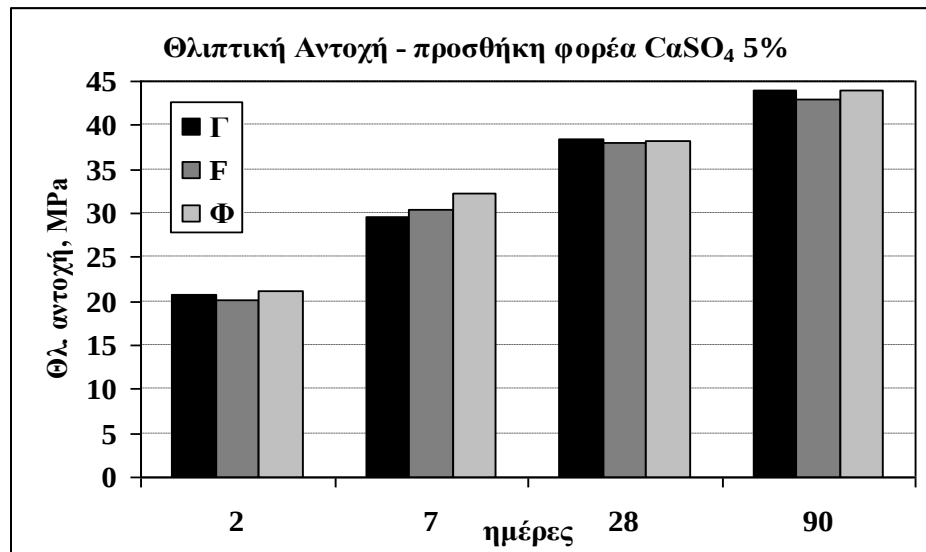
Διάγραμμα 2. Εξέλιξη αντοχών τσιμεντών με διάφορα ποσοστά μίγματος γύψου-FGD

Στο διάγραμμα 1 είναι εμφανής η μείωση των αντοχών στις πρώιμες ηλικίες (1, 2 ημέρες) που προκαλεί η προσθήκη της φωσφογύψου. Πάντως οι διαφορές των αντοχών δεν είναι τόσο αξιόλογες, αφού βρίσκονται εντός πειραματικού σφάλματος 5% και μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για τα μίγματα των φορέων CaSO_4 οι αντοχές δε διαφοροποιούνται σημαντικά.

Όσον αφορά τους χρόνους πήξης (Διάγραμμα 3), παρατηρούμε ότι η αύξηση του ποσοστού γύψου στο μίγμα των φορέων CaSO_4 επιφέρει μια μείωση στο χρόνο πήξης. Με τη χρήση μιγμάτων φορέων CaSO_4 είναι δυνατή η ρύθμιση του χρόνου πήξης του τσιμεντού, με τη φωσφογύψο να αποτελεί τον καλύτερο ρυθμιστή πήξης, αφού όταν αναμιγνύεται με τη γύψο καλύπτει ένα ευρύ πεδίο τιμών πήξης (150-230 min). Ωστόσο δεν ενδείκνυται η χρήση της φωσφογύψου ως μοναδικού ρυθμιστή πήξης εξαιτίας της δραματικής αύξησης του χρόνου πήξης που προκαλεί και κατά συνέπεια των χαμηλών πρώιμων αντοχών (1^η ημέρα).



Διάγραμμα 3. Εξέλιξη του χρόνου πήξης τσιμεντών με διάφορα ποσοστά μιγμάτων φορέων CaSO_4



Διάγραμμα 4. Θλιπτικές αντοχές 2,7,28,90 ημερών σκυροδεμάτων με 5% φορέα θεικού ασβεστίου

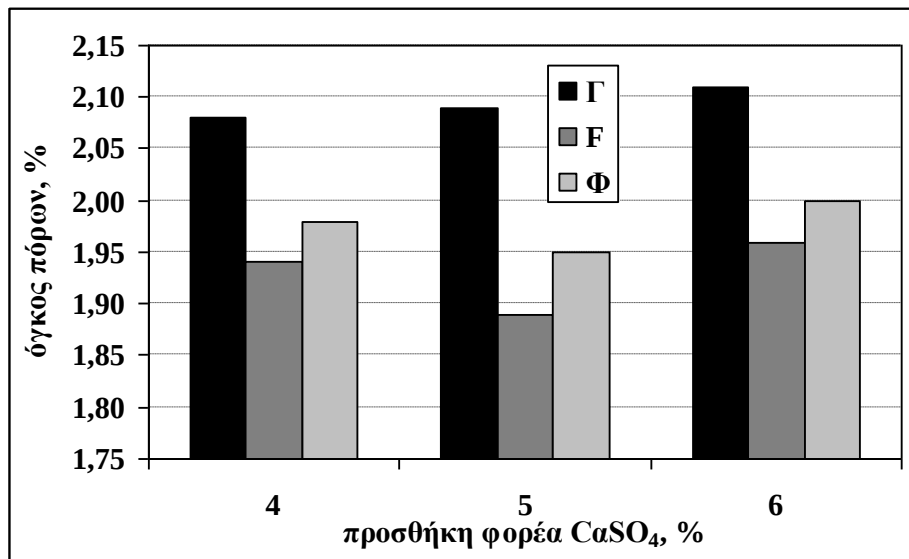
Η αύξηση αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στις διάφορες προσμίξεις που περιέχει (F^- , P_2O_5 , Zn , οργανικές ύλες κ.α.), οι οποίες υπεισέρχονται στο κρυσταλλικό πλέγμα του θεικού ασβεστίου. Το FGD προκαλεί αύξηση του χρόνου πήξης κατά 25-30% συγκριτικά με την ορυκτή γύψο και δείχνει ότι μπορεί να την υποκαταστήσει τόσο μερικά όσο και ολικά στο μίγμα του φορέα CaSO_4 .

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών επαναβεβαιώθηκαν και σε βιομηχανικές δοκιμές ως προς τις αντοχές και τους χρόνους πήξης. Η προσθήκη των τεχνητών φορέων CaSO_4 στην ορυκτή γύψο επιφέρει αύξηση της παραγωγής του βιομηχανικού μύλου χωρίς μείωση της ειδικής επιφάνειας (Blaine) του παραγόμενου τσιμέντου [12]. Αυτό καταρχάς διαφαίνεται και από τους Πίνακες 2 και 3, όπου παρατηρείται ελαφρά αύξηση της ειδικής επιφάνειας των παραγόμενων τσιμέντων όταν στο μίγμα του φορέα CaSO_4 προστίθεται φωσφογύψος και FGD.

Εργαστηριακά σκυροδέματα

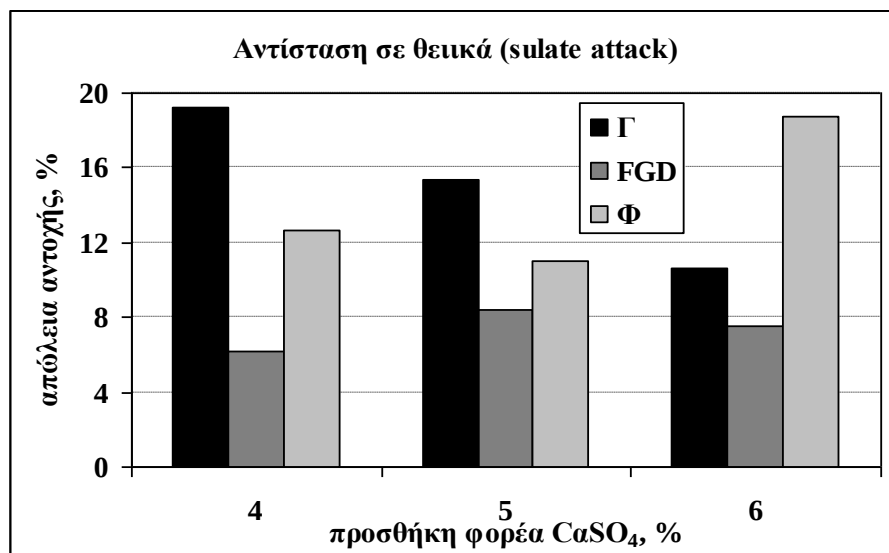
Στο Διάγραμμα 4 παρουσιάζεται η εξέλιξη των θλιπτικών αντοχών σκυροδεμάτων που προήλθαν από τσιμέντα με 5% προσθήκη φορέα CaSO_4 . Αντίστοιχη είναι η εικόνα και για προσθήκη φορέα CaSO_4 στο τσιμέντο 4 και 6%. Παρατηρώντας τις θλιπτικές αντοχές των 28 ημερών, διαπιστώνουμε καταρχάς ότι όχι απλά επιτεύχθηκε ο αρχικός στόχος για παραγωγή σκυροδέμα κατηγορίας C 20/25, αλλά ότι ουσιαστικά το σκυροδέμα που παρασκευάστηκε κατατάσσεται στην αμέσως υψηλότερη κατηγορία C25/30. Στις μικρές ηλικίες παρατηρείται γενικά μια παρόμοια συμπεριφορά σε όλα τα σκυροδέματα. Οι δύο τεχνητοί φορείς, η φωσφογύψος και το FGD, παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά δίνοντας παρόμοιες ή και καλύτερες πολλές φορές τιμές από την ορυκτή γύψο. Από τους τεχνητούς φορείς η φωσφογύψος εμφανίζει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από το FGD.

Από το Διάγραμμα 5 είναι προφανές ότι για όλα τα ποσοστά προσθήκης φορέων CaSO_4 – ρυθμιστών πήξης, τα σκυροδέματα με ορυκτή γύψο εμφανίζουν το μεγαλύτερο όγκο πόρων. Το FGD και η φωσφογύψος φαίνεται ότι μειώνουν το πορώδες του σκυροδέματος. Αυτό αποδίδεται στους μεγαλύτερους χρόνους πήξης που επιτρέπουν στο προϊόν να είναι περισσότερη ώρα εργάσιμο, με αποτέλεσμα τα υλικά (τσιμέντο και αδρανή υλικά) να ενυδατώνονται και να αναπτύσσονται καλύτερα μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την ανάπτυξη κενών πόρων στο εσωτερικό της μάζας τους.



Διάγραμμα 5. Πορώδες σκυροδεμάτων με διάφορους φορείς CaSO_4

Όσον αφορά τη μελέτη ανθεκτικότητας (Διάγραμμα 6), η γύψος εμφανίζει τη χειρότερη συμπεριφορά στην επίθεση θεικών με απώλειες αντοχής της τάξης του 15%. Οι τεχνητοί φορείς θεικού ασβεστίου εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την ορυκτή γύψο. Το FGD παρουσιάζει την μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε θειικά, δίνοντας απώλειες σε αντοχή που δεν ξεπερνούν το 8,4%. Η φωσφογύψος εμφανίζει ελαφρώς χειρότερη συμπεριφορά από το FGD με απώλειες γύρω στο 13%. Μετά από τις σχετικές ζυγίσεις, η γύψος επίσης παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας μάζας (περίπου 6%) και έπονται οι δύο τεχνητοί φορείς (<3%), γεγονός που επιβεβαιώνει την καλύτερη συμπεριφορά τους. Συνοπτικά, στην αντίσταση προσβολής από θειικά ιόντα (sulfate attack), οι φορείς CaSO_4 ακολουθούν την αύξουσα σειρά: ορυκτή γύψος < φωσφογύψος < FGD.



Διάγραμμα 6. Απώλεια αντοχής σκυροδεμάτων με 5% προσθήκη φορέα CaSO_4 λόγω προσβολής θεικών (sulfate attack)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά από την εργαστηριακή παρασκευή τσιμέντων και σκυροδεμάτων με διάφορους φορείς θεικού ασβεστίου – ρυθμιστές πήξης και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

Η χρησιμοποίηση των τεχνητών φορέων θεικού ασβεστίου για μερική ή ολική υποκατάσταση της ορυκτής γύψου δεν αλλοιώνει τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τσιμέντου και σκυροδέματος όσον αφορά τις αντοχές και την εργασιμότητά του.

Η προσθήκη FGD στο τσιμέντο επιβραδύνει το χρόνο αρχής πήξης περισσότερο από την ορυκτή γύψο. Η προσθήκη φωσφογύψου επιβραδύνει δραματικά το χρόνο αρχής πήξης. Η επιλογή μίγματος φορέων CaSO_4 σε κατάλληλη αναλογία μπορεί να ρυθμίσει το χρόνο πήξης σε επιθυμητές τιμές.

Η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε προσβολή θεικών ενισχύεται από την παρουσία τεχνητών φορέων θεικού ασβεστίου σε σχέση με τους φυσικούς. Αυτό οφείλεται στο μειωμένο πορώδες που εμφανίζουν τα σκυροδέματα που περιέχουν τεχνητούς φορείς θεικού ασβεστίου σε σχέση με τα σκυροδέματα με φυσικούς φορείς. Η καθυστέρηση της πήξης και της ενυδάτωσης που προκαλεί η φωσφογύψος και το FGD θεωρείται ότι είναι ο βασικός λόγος μείωσης του πορώδους, καθώς με την καθυστέρηση της πήξης η ρευστή μάζα του νωπού σκυροδέματος αναπτύσσεται και διαστρώνεται καλύτερα μειώνοντας τους πόρους μεταξύ των κόκκων της μάζας των ενυδατωμένων προϊόντων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. M. Singh, 2000, Influence of blended gypsum on the properties of Portland cement and Portland slag cement, Cement and Concrete Research, vol. 30, 1185-1188.
2. Tzouvalas G., Tsimas S., Papageorgiou A., 2002, Evaluation of alternative setting retarders in cement, Proc. Int. Cong.: Challenges of Concrete Construction, Innovations and developments in concrete materials and construction, Dundee, 249-257.
3. Τζουβαλάς Γ., 2004, Διερεύνηση της επίδρασης εναλλακτικών φορέων θεικού ασβεστίου στην παραγωγή και τις ιδιότητες του τσιμέντου Πόρτλαντ, Διδακτορική διατριβή.
4. Τσίμας Σ, Τζουβαλάς Γ, Αντίοχος Σ, 2003, Αξιοποίηση στερεών αποβλήτων ΔΕΗ (Ιπτάμενες τέφρες, FGD) ως πρόσθετων σε δομικά υλικά, Heleco 2003, τόμος 1, 171-178.
5. Ozkul Hulusi M., 2000, Utilization of citro- and desulphogypsum as set retarders in Portland cement, Cement and Concrete Research, vol. 30, 1755-1758.
6. Singh M., 2002, Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture, Cement and Concrete Research, vol. 32, 1-6.
7. Akin Altun, Yesim Sert, 2004, Utilization of weathered phosphogypsum as set retarder in Portland cement, Cement and Concrete Research, vol. 34, 677-680.
8. Tzouvalas G., Tsimas S., Papageorgiou A., 2003, FGD gypsum – A promising industrial by-product for the greek cement industry, Proceedings of International Symposium: Celebrating Concrete / Role of cement science in sustainable development, Dundee, 301-310.
9. Tzouvalas G., Rantis G., Tsimas S., 2004, Alternative calcium sulfate bearing materials as cement retarders. Part II: FGD gypsum, Cement and Concrete Research, vol 34, 2119-2125.

10. Gutti C., Roy A., Metcalf J., Seals R., 1996, The influence of admixtures on the strength and linear expansion of cement-stabilized phosphogypsum, *Cement and Concrete Research*, vol. 26, 1083-1094.
11. Erdem E., Olmez H., 1993, The mechanical properties of supersulphated cement containing phosphogypsum, *Cement and Concrete Research*, vol. 23, 115-121.
12. Τζουβαλάς Γ., Χανιωτάκης Ε., Τσίμας Σ., 2005, Βιομηχανική παραγωγή τσιμέντου με φυσικούς και τεχνητούς φορείς θεικού ασβεστίου ως ρυθμιστές πήξης, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 117-120.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΣΚΩΡΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΑΜΙΝΩΝ

Ε. Φρογουδάκης, Υ. Κυριλλίδη

Γ.Μ.Μ. ΑΕ ΛΑΡΚΟ, Διεύθυνση Έρευνας & Ανάπτυξης, Α. Αμαλίας 20, 10557 Αθήνα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στην Γενική Μεταλλευτική και Μεταλλουργική Α.Ε. ΛΑΡΚΟ και τα αποτελέσματά τους, σε σχέση με την αξιοποίηση της σκωρίας των ηλεκτροκαμίνων (σκωρία Η/Κ) ως πρώτη ύλη σε διάφορες εφαρμογές. Η σκωρία Η/Κ που παράγεται κατά την δραστηριότητα του εργοστασίου στη Λάρυμνα και φτάνει περίπου τους 2 εκατομμύρια τόνους ετησίως, υποχρεώνει την Εταιρεία να αναπτύξει καινοτόμες τεχνολογίες για την διαχείρισή της. Μέχρι τώρα, κάποιες ποσότητες σκωρίας Η/Κ έχουν αξιοποιηθεί είτε στην τσιμεντοβιομηχανία, είτε ως υλικό αμμοβολής. Η τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί εισάγει καινούργιες βιομηχανικές εφαρμογές, οι οποίες δίνουν την δυνατότητα για την εμπορική εκμετάλλευση αυτού του μεταλλουργικού παραπροϊόντος και για την ελαχιστοποίηση των επιδράσεων στο περιβάλλον που προκύπτουν από δραστηριότητες σχετιζόμενες με την παραγωγή νικελίου.

Τα κύρια πλεονεκτήματα θα ήταν η ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού φορτίου λόγω της απόθεσης της σκουριάς και η πλήρης εναρμόνιση με τους σχετικούς κανονισμούς. Επιπροσθέτως, η πλήρης χρήση της σκωρίας Η/Κ ως υποκατάστατο των αδρανών θα ευνοούσε το περιβάλλον σημαντικά, αφού θα έπρεπε να εξορυχτούν λιγότερα πρωτογενή υλικά όπως τα ασβεστολιθικά αδρανή, με κέρδος την περιορισμένη αλλοίωση του τοπίου και την μειωμένη κατανάλωση της ενέργειας για την κατασκευαστική και κεραμική βιομηχανία.

Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν και έδωσαν επιτυχή αποτελέσματα αφορούν:

1. την χρήση της σκουριάς (60%, +0.5 -1.5) σαν υλικό αμμοβολής
2. την χρήση της σκουριάς σαν αδρανές πρόσθετο στο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής σε αντικατάσταση των ασβεστολιθικών αδρανών
3. την χρήση της σκουριάς σαν πρόσθετο στο τσιμέντο Portland, λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της
4. σκουριάς, αντί των ασβεστολιθικών αδρανών, στο ισχνό τσιμέντο για την κατασκευή της υπόβασης των δρόμων
5. την χρήση της σκουριάς για την παραγωγή αντιολισθηρού ασφαλτομίγματος αντικαθιστώντας 100% τα ασβεστολιθικά αδρανή, καθώς και
6. την χρήση της σκουριάς στην παραγωγή αντιολισθηρών πλακών πεζοδρόμησης.

Επίσης, περιγράφονται και άλλες μελέτες για την σκουριά με ελπιδοφόρα αποτελέσματα, όπως:

1. την χρήση της σαν πρόσθετο για κατασκευή οικοδομικών υλικών, όπως τούβλα και κεραμίδια, με αύξηση της μηχανικής αντοχής τους έως και 40% χωρίς παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας έψησης
2. την χρήση της στην παραγωγή πυρίμαχων τούβλων για τζάκια ή θερμοσυσσωρευτές
3. την χρήση της σε πυρίμαχες μάζες Fetling για μεταλλουργικούς φούρνους τήξης και τέλος
4. την χρήση της στην παραγωγή υψηλής αντοχής αλουμινούχου τσιμέντου.

Λέξεις κλειδιά: σκωρία, παραπροϊόντα, ανακύκλωση, κατασκευή δρόμων, τσιμέντο, υλικά κατασκευών, μεταλλουργία νικελίου, χρήση σκωρίας ηλεκτρικών καμίνων, διαχείριση αποβλήτων

UTILIZATION OF ELECTRIC ARC FURNACE SLAG

E. Frogoudakis, Y. Kirillidi

G.M.M. S.A. LARCO, Research and Development Dept., Amalias 20, 10557 Athens

ABSTRACT: This report presents research carried out by General Mining and Metallurgical S.A. LARCO regarding the utilization of Electric Arc Furnace slag (EAF-slag) as raw material in various applications. EAF slag is a by-product of the production process at Larymna plant that averages about 2 million tones per year and drives the company to develop innovative technology for its utilization. Until now some amount of EAF-slag has been used either in the cement industry or as sandblast material. The technology developed shows the possibility of new industrial applications, which allow for a commercial utilization of this metallurgical by-product and also for the minimization of the environmental impact deriving from activity related to nickel production.

Keywords: slag, by-products, recycling, pavement construction, cement, building materials, nickel metallurgy, EAF-slag utilization, waste management.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά την παραγωγή σιδηρονικελίου της ΛΑΡΚΟ, παράγονται δύο είδη σκωρίας: η σκωρία Ηλεκτροκαμίνων και η σκωρία Μεταλλακτών. Και οι δύο είναι ανακυκλώσιμες, αλλά σ' αυτό το άρθρο παρουσιάζονται οι μελέτες για τις χρήσεις της σκωρίας Ηλεκτροκαμίνων. Περίπου 2 εκατομμύρια τόνοι σκουριάς παράγονται ετησίως από τις ηλεκτρικές καμίνους στο μεταλλουργικό εργοστάσιο παραγωγής σιδηρονικελίου στη Λάρυμνα. Αυτή η ποσότητα αντιστοιχεί στο 90-95% της συνολικής ετήσιας τροφοδοσίας σε μέταλλευμα. Εξ' αιτίας της τεράστιας ποσότητας της παραγόμενης σκωρίας η ΛΑΡΚΟ εκπονεί έρευνα τα τελευταία 10 χρόνια για τις διαφορετικές δυνατότητες χρήσης της. Η χρήση κάποιων ποσοτήτων της σκωρίας σαν υλικό αμμοβολής (60%, +0.5 -1.5), έχει μειώσει το πρόβλημα διάθεσης αλλά όχι στα επιθυμητά επίπεδα. Ακόμη το μεγαλύτερο μέρος της θα απορρίπτεται στην θάλασσα μέχρι και το 2006, ενώ η χερσαία απόθεση σε μελετημένο χώρο κοντά στο εργοστάσιο έχει αποφασιστεί ότι θα είναι η πρακτική διαχείρισης από το τέλος του 2006 και έπειτα. Συνεπώς, νέοι τρόποι πρέπει να βρεθούν για την αντιμετώπιση της όλο και αυξανόμενης παραγωγής ενός τέτοιου υλικού. Νέες μέθοδοι ανακύκλωσης της σκωρίας επιβάλλονται πια και χρειάζεται να μελετηθούν για να αποδειχθεί ότι είναι περιβαλλοντικά φιλικές και προωθούν την έννοια της αειφορίας.

Από την άλλη μεριά, οι παραδοσιακές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των δρόμων και σε άλλα οικοδομικά προϊόντα είναι φυσικό χαλίκι και σκύρα. Και τα δύο είναι υλικά πρωτογενή που εξορύσσονται από μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους. Όταν αυτοί αξιοποιηθούν δεν θα υπάρχουν άλλοι διαθέσιμοι. Το φαινόμενο μείωσης των φυσικών πόρων και η καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος επιβάλλουν την ανακύκλωση βιομηχανικών παραπροϊόντων όπως η σκουριά της ΛΑΡΚΟ σε διάφορες εφαρμογές με αντικατάσταση των πρωτογενών υλικών.

Η Σκωρία Ηλεκτροκαμίνων με τον τρόπο που ψύχεται, με καταιονισμό θαλασσινού νερού, έχει μέγεθος κόκκων -5mm και αυξημένο πορώδες. Στον Πίνακα 1 δίνεται ενδεικτική χημική ανάλυση της Σκωρίας Ηλεκτροκαμίνων.

Πίνακας 1. Ενδεικτική χημική ανάλυση της Σκωρίας Ηλεκτροκαμίνων

FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	Ni
36-43%	1-6%	34-36%	2-5%	7-12%	2-5%	2-3%	0,10-0,15%

Η χρήση τέτοιων υλικών όπως η σκουριές, είναι ευρέως διαδεδομένη στον κατασκευαστικό τομέα σ' ολόκληρη την Ευρώπη και η τάση είναι όλες οι σκωρίες να χαρακτηρίζονται παραπροϊόντα. Αν και η σκουριά της ΛΑΡΚΟ έχει χαρακτηριστεί ως «μη επικίνδυνη» και «μη αδρανής» στην εθνική νομοθεσία, η ελληνική αγορά δεν είναι ακόμα ανοικτή στην χρήση παραπροϊόντων όπως η σκουριές ως υποκατάστατα των οικοδομικών πρώτων υλών. Η εθνική και η ευρωπαϊκή νομοθεσία διαφέρουν σε αρκετά σημεία, τα οποία πρέπει να οριστούν και να διευθετηθούν. Το άρθρο αυτό αποτελεί μέρος μιας προσπάθειας που πραγματοποιείται προς την κατεύθυνση των βημάτων που η ελληνική πλευρά πρέπει να κάνει ώστε να αναβαθμιστούν οι κανονισμοί που αφορούν την κατασκευή και να υιοθετηθούν οι χρήσεις των μεταλλουργικών σκωριών.

Η ΛΑΡΚΟ έχει εκπονήσει σημαντική έρευνα, κυρίως μέσα στα πλαίσια Ευρωπαϊκών και Εθνικών ερευνητικών προγραμμάτων. Κάποια από αυτά είναι:

1. «Δυνατότητες εμπορικής αξιοποίησης σκουριάς ηλεκτροκαμίνων της Λάρκο» (ΠΑΒΕ 92ΒΕ253) Συνολικός προϋπολογισμός: 69.300 Ευρώ – Ανάδοχος φορέας: Γ.Μ.Μ. ΑΕ ΛΑΡΚΟ. Σ' αυτό το ερευνητικό έργο οι εργαστηριακές και πιλοτικές δοκιμές επαλήθευσαν την δυνατότητα χρήσης της σκουριάς σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή προϊόντων κατασκευών, 1994 και 2000.

2. «Συμπαγωγή αλουμινούχου τσιμέντου υψηλών προδιαγραφών και ειδικών σιδηροκραμάτων από επιτόπια παραγόμενα μεταλλουργικά απορρίμματα (ρευστές σκωρίες κλπ) και εγχώριες πρώτες ύλες» (ΕΠΕΤ II). Συνολικός προϋπολογισμός: 927.000 Ευρώ – Ανάδοχος φορέας: Γ.Μ.Μ. ΑΕ ΛΑΡΚΟ. Ο κύριος στόχος του έργου ήταν η ανάπτυξη μιας διεργασίας για την ταυτόχρονη παραγωγή τσιμέντου υψηλών προδιαγραφών και ειδικών σιδηροκραμάτων, από εγχώριες πρώτες ύλες και από επιτόπια παραγόμενα μεταλλουργικά και μεταλλευτικά απορρίμματα, δηλαδή η ανάπτυξη νέων υλικών για την κατασκευαστική βιομηχανία με εφαρμογή νέων μεθόδων παραγωγής. Αναζητείται τεχνητή λύση χειρισμού της ζεστής σκωρίας των Η/Κ της ΛΑΡΚΟ προκειμένου να ωφεληθούμε της ενέργειας αυτής, ώστε σε ενδεχόμενη ίδρυση βιομηχανικής παραγωγής αλουμινούχου τσιμέντου, να υπάρχει δυνατότητα παραγωγής του με ανταγωνιστικό κόστος.

3. «Ανάπτυξη συστήματος συνολικής διαχείρισης και αξιοποίησης των στερεών αποβλήτων της ΛΑΡΚΟ» (ΕΠΕΤ 98 ΒΙΑ 5). Συνολικός προϋπολογισμός: 616.287 Ευρώ – Ανάδοχος φορέας: Γ.Μ.Μ. ΑΕ ΛΑΡΚΟ. Αντικείμενο του έργου ήταν η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης και αξιοποίησης της σκουριάς της ηλεκτροκαμίνου της ΛΑΡΚΟ. Το σύστημα περιλαμβάνει εκτός από τις χρήσεις της σκουριάς ηλεκτροκαμίνων, την αλλαγή του τρόπου στερεοποίησής της ώστε να παράγεται υλικό κατάλληλο για χρήση σε αντιστοιχιστικούς τάπητες, υλικό για το οποίο υπάρχει σημαντική ζήτηση. Λόγω των επενδύσεων των τελευταίων χρόνων στο Μεταλλουργικό Συγκρότημα (εκσυγχρονισμός ηλεκτροκαμίνων) και μετά την ολοκλήρωσή τους θα αναζητηθούν οι κατάλληλοι χώροι στο χώρο του εργοστασίου και στην γειτονία των Η/Κ για την παραγωγή σκωρίας Η/Κ βραδείας ψύξης ώστε να αξιοποιηθούν τα αποτελέσματα της.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΡΟΜΩΝ & ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Σκωρία ταχείας ψύξεως

Η σημερινή εμπειρία έχει δείξει ότι η σκωρία που ψύχεται βραδέως και προέρχεται από κάμινο με αέρα υπό πίεση χρησιμοποιείται ευρέως στο σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland, σε ασφαλτικό σκυρόδεμα, στην άσφαλτο και την υπόβαση δρόμων στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Στην Αλαμπάμα χρησιμοποιείται σε ασφαλτικό σκυρόδεμα για κατασκευή πεζοδρομίων. Έχει ήδη αποδειχθεί ότι αυτού του είδους η σκουριά σε αντικατάσταση των αδρανών, έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα παραδοσιακά φυσικά αδρανή υλικά, όπως είναι το χαλίκι και ο τριμμένος ασβεστόλιθος που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτιρίων και δρόμων. Στον Καναδά η σκωρία από την παραγωγή χάλυβα χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα στην πλήρωση δρόμων.

Η ΛΑΡΚΟ έχει ξεκινήσει ένα πιλοτικό πρόγραμμα για την παρουσίαση δύο πιθανών χρήσεων της σκωρίας Η/Κ, στην κατασκευή δρόμων: σαν πρώτη ύλη που αντικαθιστά όλα τα αδρανή στην υπόβαση των δρόμων και σαν μίγμα στην επιφανειακή στρώση των δρόμων. Αυτό θα καταλήξει στην υποκατάσταση των φυσικών πρώτων υλών, τα οποία επί του παρόντος χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία κατασκευής δρόμων. Όλη η συσσωρευμένη γνώση και η εμπειρία που έχει αποκτηθεί θα ωφελήσει τις εταιρείες παραγωγής σιδηρονικελίου, την εγχώρια και παγκόσμια βιομηχανία κατασκευής δρόμων, καθώς και την μεταλλουργική βιομηχανία γενικότερα και θα ενθαρρύνει την ανακύκλωση των παραπροϊόντων στο μέλλον. Οι μεταλλευτικές και κατασκευαστικές βιομηχανίες θα μπορούσαν μέσα από συνεργασίες να αξιοποιήσουν την εμπειρία που θα αποκτηθεί από το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα για την ανακύκλωση της σκωρίας Η/Κ. Τα οφέλη που θα προκύψουν θα βοηθήσουν:

- Τις μεταλλουργικές βιομηχανίες να λύσουν το πρόβλημα της απόθεσης της παραγόμενης σκουριάς
- Τις εταιρείες κατασκευής δρόμων να μειώσουν το κόστος πρώτων υλών

- Όλους του εμπλεκόμενους να βελτιώσουν το επιστημονικό και τεχνικό τους επίπεδο

Παρόμοια οφέλη θα προκύψουν και για άλλες χώρες όταν θα διαχυθεί η τεχνογνωσία από το πρόγραμμα.

Σκωρία βραδείας ψύξεως

Από τους ηλεκροκλιβάνους η σκουριά εξέρχεται μέσω υδρόψυκτου αγωγού και προσπίπτει σε ρευστή κατάσταση κάθετα σε θαλασσινό νερό, όπου ψύχεται ακαριαία και κοκκοποιείται σε άμορφη κατάσταση. Η απότομη ψύξη γίνεται από τους 1200-1400 °C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το στερεό υλικό έχει κοκκομετρία 0-5 mm ενώ οι κόκκοι είναι πορώδεις. Συνεπώς, η νέα προσπάθεια ήταν η διαφοροποίηση του τρόπου στερεοποίησης της ρευστής σκωρίας με βραδεία ψύξη, ώστε τα χονδρομερή να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αδρανές προσθετικό υλικό στο υψηλής αντοχής σκυρόδεμα, ενώ το ψιλομερές κλάσμα που προκύπτει μετά την λειοτρίβηση και την ταξινόμηση είναι κατάλληλο για χρήση σαν αντλιοσθηρό υλικό σε ασφαλτόστρωση δρόμων ή στην κατασκευή αντλιοσθηρών πλακών πεζοδρομίου. Η ρευστή σκωρία χύθηκε σε όρυγμα βάθους 40 cm και το υλικό δοκιμάστηκε για τις αντλιοσθηρές του ιδιότητες. Οι δοκιμές απέδειξαν ότι η σκωρία H/K βραδείας ψύξης είναι απόλυτα κατάλληλο υλικό για αυτές τις χρήσεις, λόγω των δραματικά αυξημένων μηχανικών ιδιοτήτων της και της μικρής απώλειας υλικού (Los Angeles Test) (G.M.M. SA Larco and Hellenic Center of Fire-proof Materials Research S.A., 2001).

ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Τσιμέντο Portland

Από την δεκαετία του '70, οι ελληνικές τσιμεντοβιομηχανίες χρησιμοποιούσαν την σκωρία H/K της ΛΑΡΚΟ μετά από λειοτρίβηση σαν προσθετικό υλικό στο τσιμέντο Portland λόγω των υδραυλικών της ιδιοτήτων. Ωστόσο, αυτή η χρήση ουσιαστικά σταμάτησε το 2002, όταν εκδόθηκαν τα καινούργια πρότυπα για το τσιμέντο. Σύμφωνα με αυτά, ο εν λόγω τύπος σκωρίας αποκλείστηκε από την λίστα των πιθανών προσθετικών υλικών για την εγχώρια παραγωγή τσιμέντου. Στην επόμενη αναθεώρηση των Ευρωπαϊκών Προτύπων θα πρέπει να γίνει προσπάθεια για τη ένταξη της σκωρίας H/K στην λίστα.

Υψηλής αντοχής αλουμινούχο τσιμέντο

Η χρήση της σκωρίας H/K στην παραγωγή αλουμινούχου τσιμέντου υψηλών προδιαγραφών (High Alumina Cement - HAC) διερευνήθηκε με εργαστηριακές και πιλοτικές δοκιμές. Η διαδικασία που ακολούθησε αφορούσε αναγωγική τήξη των μιγμάτων σκωρίας με εγχώριο βωξίτη διασπορικού τύπου (χαμηλής μεταλλουργικής αξίας) και ασβεστόλιθου (παραπροϊόντα εξόρυξης λατερίτη). Οι εργαστηριακές δοκιμές βοήθησαν στον προσδιορισμό τις κύριες παραμέτρους της διεργασίας, σχετικά με τις αναλογίες πρώτων υλών, την κινητική της αναγωγής και τον ρυθμό απόψυξης του προϊόντος. Προέκυψε ότι περιεκτικότητα σε MgO μικρότερη από 5% δεν επιδρά στις ιδιότητες του HAC. Επιπροσθέτως, η παρουσία άνθρακα στο λουτρό μεταλλικού σιδήρου είναι αναγκαία για την επαρκή αναγωγή του FeOx από τη σκουριά. Τα προϊόντα των εργαστηριακών δοκιμών ανέπτυξαν αντοχή σε θλίψη κοντά σε εκείνη HAC. Οι πιλοτικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε Ηλεκτρική Κάμινο Τόξου 5t και παρήχθησαν 4t σκουριάς.

Τα κύρια συμπεράσματα από τις πιλοτικές δοκιμές ήταν:

- α) Η επένδυση από μαγνησίτη δεν είναι κατάλληλη λόγω της φθοράς της που οδηγεί σε αύξηση του MgO στην τελική σκουριά και

β) Η απουσία αρχικής αντοχής στο πιλοτικό προϊόν αποδίδεται στον υψηλότερο ρυθμό απόψυξης σε σύγκριση με τις εργαστηριακές δοκιμές.

Το αλουμινούχο τσιμέντο υψηλών προδιαγραφών έχει το πλεονέκτημα ότι αποκτά πολύ γρήγορα την μέγιστη αντοχή του, συνεπώς θεωρείται εξαιρετικά κατάλληλο για χρήση σε μεγάλα κατασκευαστικά έργα που χρησιμοποιούν τεχνικές συνεχόμενης χύτευσης (G.M.M. SA Larco and University of Patras, 1997).

ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ

Χρήση στην κεραμοποιεία

Για την εργαστηριακή ανάπτυξη οικοδομικών προϊόντων (κεραμιδιών) με προσθήκη σκουριάς μελετήθηκαν:

- Το εφικτό ποσοστό προσθήκης της σκουριάς για την παραγωγή των κεραμιδιών.
- Η βέλτιστη κοκκομετρία της σκουριάς.
- Το καταλληλότερο ποσοστό υγρασίας των προϊόντων αυτών κατά την μορφοποίηση.
- Η θερμοκρασία έψησης του τελικού προϊόντος.
- Τέλος έγινε αξιολόγηση των παραγόμενων προϊόντων.

Τα κεραμίδια παράγονται από μίγμα δύο διαφορετικών τύπων αργιλικών χωμάτων. Το ένα χόμα παρουσιάζει πλαστικές ιδιότητες και το άλλο δεν παρουσιάζει πλαστικές ιδιότητες. Το επί τοις εκατό ποσοστό κατά βάρος, του κάθε χόματος που περιέχεται στο μίγμα είναι: 60% για το πλαστικό και 40 % για το μη πλαστικό χόμα. Επειδή η σκουριά δεν παρουσιάζει πλαστικές ιδιότητες, εργαστηριακά μελετήθηκε η δυνατότητα μερικής ή ολικής αντικατάστασης του μη πλαστικού χόματος από σκουριά της ΛΑΡΚΟ.

Από τις εργαστηριακές δοκιμές, συμπεραίνουμε ότι η σκουριά της εταιρείας ΛΑΡΚΟ είναι ένα άριστο υλικό για χρήση στην κεραμική βιομηχανία παραγωγής οικοδομικών «προϊόντων». Εμπλουτίζει τα προϊόντα αυτά με πυρίμαχες φάσεις οι οποίες προσδίδουν στο τελικό προϊόν

- Αυξημένη μηχανική αντοχή.
- Μικρή συρίκνωση των διαστάσεων κατά την ξήρανση και έψηση.
- Μικρή υδαταπορροφητικότητα
- Καλή συμπεριφορά στη δοκιμή αντοχής σε παγετό
- Μειωμένο ενεργειακό κόστος παραγωγής των προϊόντων, λόγω του μειωμένου ποσοστού υγρασίας που απαιτείται για την παραγωγή τους

Αντίθετα κατά την παραγωγή θα πρέπει να προσεχθεί πολύ η κοκκομετρία της σκουριάς, γιατί οι χονδροί κόκκοι της είναι αδρανείς, δεν αντιδρούν με αυτούς του χόματος και δεν έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Με βάση τα παραπάνω δημιουργούνται οι προοπτικές για δημιουργία κεραμικών προϊόντων (τούβλα-κεραμίδια) με αυξημένες μέχρι και 40% των μηχανικών αντοχών τους, χωρίς αυξημένη θερμοκρασία έψησης. Αυτό σημαίνει ότι είναι πλέον εφικτή η παρασκευή κεραμιδιών και τούβλων με πολύ λεπτότερα τοιχώματα, με συνέπεια μεγάλη μείωση στα διακινούμενα υλικά και άρα οικονομία πρώτης ύλης και μείωση της ενεργειακής απαίτησης.

Τα προϊόντα έχουν μηδενική υδαταπορροφητικότητα και αν ψηθούν σε θερμοκρασία κατά 30 °C υψηλότερη της συνηθισμένης, αποκτούν υαλώδη υφή που τα καθιστά εξαιρετικά για χρήση σε εξωτερικά (εμφανή) μέρη κατασκευών (G.M.M. SA Larco and Hellenic Center of Fire-proof Materials Research S.A., 2000).

Πυριάντοχα τούβλα για χρήση σε θερμοσυσσωρευτές ή τζάκια

Κατασκευάστηκαν δύο είδη δοκιμίων, ένα με 100% σκουριά και ένα με περιεκτικότητα σε σκουριά 50%, κοκκομετρία -1mm και 50% MgO. Τα δοκίμια μετά από ξήρανση τους σε επίπεδο υγρασίας 0,5% ψήθηκαν στους 700 °C και τους 900 °C. Από τις καμπύλες αποφόρτισης της θερμότητας φαίνεται ότι δεν παρουσιάζονται διαφορές στον ρυθμό αποφόρτισης και ως εκ τούτου τα δοκίμια από σκουριά θεωρούνται εφάμιλλα με αυτά του εμπορίου και άρα κατάλληλα για θερμοσυσσωρευτές (G.M.M. SA Larco and Hellenic Center of Fire-proof Materials Research S.A., 1994).

Πυρίμαχες μάζες Fetling

Πυρίμαχες μάζες Fetling χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεταλλουργικούς κλιβάνους τήξης (ηλεκτροκλίβανοι, κάδοι μεταφοράς χάλυβος, κλπ.) σε μια προσπάθεια περιορισμού των φθορών της μόνιμης πυρίμαχης επένδυσης.

Η απαιτούμενη πυριμαχικότητα στις μάζες Fetling είναι χαμηλή για να είναι εφικτή η εύκολη συγκόλληση της μάζας με τα τοιχώματα του κλιβάνου στην θερμοκρασία λειτουργίας του. Έτσι, μάζες με υψηλή πυριμαχικότητα που προέρχονται από κοιτάσματα μαγνησίτου με χαμηλό σίδηρο όπως είναι τα ελληνικά κοιτάσματα δεν είναι κατάλληλες για αυτή την χρήση. Η προσθήκη στην πρώτη ύλη υλικού με υψηλό Fe₂O₃ (σκουριά ΛΑΡΚΟ) μπορεί να μειώσει την πυριμαχικότητα του μίγματος και επομένως να δημιουργήσει δυνατότητα για αξιοποίηση Ελληνικών μαγνησιακών πρώτων υλών αναμεμιγμένων με σκουριά ΛΑΡΚΟ σε χρήσεις Fetling (G.M.M. SA Larco and Hellenic Center of Fire-proof Materials Research S.A., 1994).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. G.M.M. SA Larco and Hellenic Center of Fire-proof Materials Research S.A., 1994. 'Electric Furnace Slag commercial utilization potential' Final Report, Industrial Research & Development Programs-General Secretariat for Research and Technology.
2. G.M.M. SA Larco and Hellenic Center of Fire-proof Materials Research S.A., 2000. 'Utilization of Electric Furnace Slags in the ceramic industry'.
3. G.M.M. SA Larco and University of Patras 1997. 'High Standard Alumina Cement production from ERF slag, limestone and diasporic bauxite' Final Report, Operational Program for Research & Technology-General Secretariat for Research and Technology.
4. G.M.M. SA Larco and Hellenic Center of Fire-proof Materials Research S.A., 2001. 'Development of a system for the total management and utilization of LARCO's solid wastes' Final Report, Operational Program for Research & Technology-General Secretariat for Research and Technology.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΙΛΟΤΙΚΟΥ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΣΙΜΕΝΤΟ-ΤΕΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑ 5 ΧΡΟΝΙΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ

Ι. Παπαγιάννη¹, Χ. Βασιλόπουλος², Γ. Κουτσός³, Ε. Αναστασίου¹

¹Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,

²Χ. Βασιλόπουλος Ε.Ε., ³ΤΕΧΝΟΜΠΕΤΟΝ Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στο πλαίσιο του προγράμματος ΕΠΕΤ 98ΒΙΑ19 κατασκευάστηκε, σε συνεργασία με τους φορείς ΔΕΗ και ΑΕΓΕΚ κατασκευαστική, 500m πιλοτικού οδοστρώματος από σκυρόδεμα. Πιο συγκεκριμένα 250m άκαμπτο οδόστρωμα από σκυρόδεμα και 250m οδόστρωμα από σκυρόδεμα με 4-5cm ασφαλική κάλυψη στη θέση Γεφύρι Του Πασά, οδικού άξονα Κοζάνης-Γρεβενών. Στο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε μίγμα τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας 30-70 ως κονία. Ο δρόμος αυτός έχει αφεθεί στις κλιματικές συνθήκες και σε κυκλοφορία βαρέων οχημάτων παρακείμενης βιομηχανίας. Στην εργασία παρουσιάζονται τα δεδομένα κατασκευής των οδοστρωμάτων αυτών και τα αποτελέσματα από τους ελέγχους που έγιναν σε αριθμό καρώτων που λήφθηκαν πέντε χρόνια μετά την κατασκευή των πιλοτικών αυτών τμημάτων δρόμου. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά, οι αλλοιώσεις της μικροδομής του σκυροδέματος με μεγάλο ποσοστό τέφρας. Βάσει των αποτελεσμάτων είναι φανερό ότι είναι εφικτή η κατασκευή δρόμων επαρχιακού δικτύου με τσιμεντοτεφροσκυρόδεμα προς όφελος της οικονομίας των έργων, εφόσον δοθεί η δέουσα προσοχή στη φάση κατασκευής.

Λέξεις κλειδιά: οδόστρωμα από σκυρόδεμα, τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα, ανθεκτικότητα.

TESTING A CONCRETE PAVEMENT DEMONSTRATION PROJECT 5 YEARS AFTER ITS CONSTRUCTION

Ι. Παπαγιάννη¹, Χ. Βασιλόπουλος², Γ. Κουτσός³, Ε. Αναστασίου¹

¹*Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki*

²*H. Vasilopoulos Ltd.,* ³*TECHNOBETON S.A.*

ABSTRACT: In the framework of EPET 98BIA19 European Research Programme and in cooperation with the Greek Public Power Corporation and AEGEK General construction Company, 500m of concrete pavement was constructed as a demonstration project for concrete road construction. The pavement has 250m length of visible concrete surface and 250m length with a 5cm bituminous surface layer and is situated at Gefyri Tou Pasa location, Grevena. A mixture of Portland cement and Greek High Calcium Fly Ash at 30-70% proportioning was used as a binder. The road has been exposed without maintenance to environmental conditions and to the wearing due to heavy vehicle traffic from a nearby industry. In the report are presented the construction data for the pavement and the results of the tests carried out on a number of cores drilled five years after the construction of the demonstration project. The properties measured were mechanical characteristics and alterations of the high fly ash concrete microstructure. Based on the results it is obvious that rural network road construction by using cement and high volume of fly ash is feasible, provided that care will be taken in keeping construction details. This has a direct impact to the cost of road construction.

Keywords: concrete pavements, cement, high calcium fly ash, durability

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τη διάρκεια του Ερευνητικού Προγράμματος ΕΠΕΤ 98ΒΙΑ19 «Χρησιμοποίηση Ιπτάμενης Τέφρας Πτολεμαΐδας σε Δομικές Εφαρμογές» 1998-2001, με ανάδοχο το Α.Π.Θ. και εταίρους τη Δ.Ε.Η. και την κατασκευαστική εταιρεία Α.Ε.Γ.Ε.Κ., έγινε ένα τμήμα δρόμου 500 μέτρων σε προϋπάρχοντα αγροτικό δρόμο που αποτελεί διακλάδωση του κεντρικού άξονα Γρεβενά-Κοζάνη, στη θέση Γεφύρι του Πασά.

Η κατασκευή του δρόμου έγινε με δαπάνες της Α.Ε.Γ.Ε.Κ. Η μελέτη των διαστάσεων του οδοστρώματος έγινε από το Εργαστήριο Οδοποιίας του Α.Π.Θ.* Για τη σύνθεση των σκυροδεμάτων με τέφρα που χρησιμοποιήθηκαν και την επίβλεψη της κατασκευής υπεύθυνο ήταν το Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Α.Π.Θ. Οι αναλογίες αναμίξεως των συστατικών για τις στρώσεις $d_2-20\text{cm}$ και $d_2-25\text{cm}$ του σκυροδέματος χωρίς και με επικάλυψη φαίνονται στον Πίνακα 1. Η τέφρα που χρησιμοποιήθηκε ήταν αλεσμένη και ομογενοποιημένη. Τα στοιχεία της τέφρας ήταν:

- Συγκρατούμενο ποσοστό στο κόσκινο $45\mu\text{m}$: $R_{45} = 19\%$
- Ποσοστό διαθέσιμου CaO : $5,33\%$
- Ποσοστό ελεύθερου CaO : $2,99\%$
- Ποσοστό SO_4 : $4,7\%$

Σημειώνεται ότι οι συνθήκες κατασκευής δεν ήταν οι ευνοϊκότερες για την οδόστρωση (υψηλή θερμοκρασία, μεταφορά του υλικού με ανοικτά οχήματα, μη κατάλληλο όχημα δόνησης στρώσεων πάνω από 10 εκ., δυσλειτουργία του δονητικού οχήματος). Το σκυρόδεμα διαστρώθηκε με δονητικό όχημα χωρίς εγκιβωτισμό. Αρμοί χαράχθηκαν ανά 4m και πληρώθηκαν με ασφαλτική μαστίχη.

Πίνακας 1. Αναλογίες σύνθεσης σκυροδέματος

Υλικά	Χωρίς επικάλυψη	Με επικάλυψη
Ιπτάμενη Τέφρα (Ι.Τ.)	203	126
Τσιμέντο CEM Ι42.5	87	54
Άμμος	643	1925
Ρύζι	255	
Γαρμπίλι	273	
Σκύρα	728	
Νερό / (Ι.Τ. + Τσιμέντο)	0,40-0,41	0,58
Rheobuild (SPL)	300-600lt/m ³	2,5% κ.β. Ι.Τ.+τσιμέντο

ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΔΡΟΜΟΥ

Το τμήμα του δρόμου, που κατασκευάστηκε το 2000, χρησιμοποιείται κυρίως από βαρέως τύπου οχήματα του παρακείμενου εργοστάσιου ασφάλτου (Εικόνα 1) με τα οποία μεταφέρονται και αδρανή υλικά. Στο χρονικό αυτό διάστημα των πέντε περίπου ετών ο δρόμος έχει εκτεθεί σε αρκετούς παγετούς. Μεγάλο μέρος του δρόμου είναι επίσης πλημμυρισμένο από το παράλληλο με το δρόμο αρδευτικό κανάλι (Εικόνα 2).

* Καθ. κ.κ. Α. Μουρατίδης, Γ. Τσώχος



Εικόνα 1. Γειτονικό εργοστάσιο ασφάλτου



Εικόνα 2. Διαβροχή δρόμου από άρδευση γειτονικών αγρών

Κατά την επιθεώρηση του δρόμου (τμήμα με σκυρόδεμα και τμήμα με σκυρόδεμα + 4-5 εκατοστά ασφαλτική επικάλυψη) έγινε οπτική παρατήρηση και φωτογράφιση κατά μήκος και κατά πλάτος του δρόμου και λήψη εννέα καρτών, σε τρεις οριζόντιες τομές από τρία καρώτα σε κάθε τομή (διαστάσεων 5x10cm ή 10x20cm) (Εικόνες 3, 4). Τα δοκίμια που εξήχθησαν ελέγχθηκαν ως προς την αντοχή τους σε θλίψη. Μερικά από αυτά θραύτηκαν σε εφελκυσμό από διάρρηξη και σε ορισμένα έγινε ενδεικτικά μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας. Επιπρόσθετα έγινε μικροσκοπική εξέταση, μέτρηση του pH και ορυκτολογική ανάλυση του σκυροδέματος των στρώσεων, καθώς και μέτρηση του ποσοστού διαλυτών αλάτων που περιέχονται στο σκυρόδεμα, λόγω της ιδιαιτερότητας του σκυροδέματος, που περιείχε μεγάλο ποσοστό ιπτάμενης τέφρας.

Οπτική παρατήρηση

Όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή τα τμήματα που κατασκευάστηκαν δεν είναι εγκιβωτισμένα και ιδιαίτερα στα άκρα στην περίπτωση του δρόμου χωρίς ασφαλτόστρωση το σκυρόδεμα χαλαρώνει και απομακρύνεται (Εικόνες 5, 6). Το οδόστρωμα από σκυρόδεμα χωρίς ασφαλτόστρωση είναι καλύτερα συμπακνωμένο και σταθερό στο κέντρο (ένα μέτρο αριστερά και ένα μέτρο δεξιά του κατά μήκος άξονα), ενώ στα άκρα –όπου η συμπύκνωση ήταν κακή από κατασκευής– το οδόστρωμα έχει αρχίσει να αποτρίβεται (Εικόνες 7, 8). Χαρακτηριστικές εικόνες ποιότητας σκυροδέματος στο κέντρο και στα άκρα δίνονται στις Εικόνες 9, 10 και 11.



Εικόνα 3. Πυρηνοληψία σε θέση με καλά συμπακνωμένο σκυρόδεμα



Εικόνα 4. Πυρηνοληψία σε θέση με ασφαλτική επικάλυψη



Εικόνα 5. Άκρο δρόμου χωρίς ασφαλτόστρωση



Εικόνα 6. Άκρο δρόμου με ασφαλτόστρωση



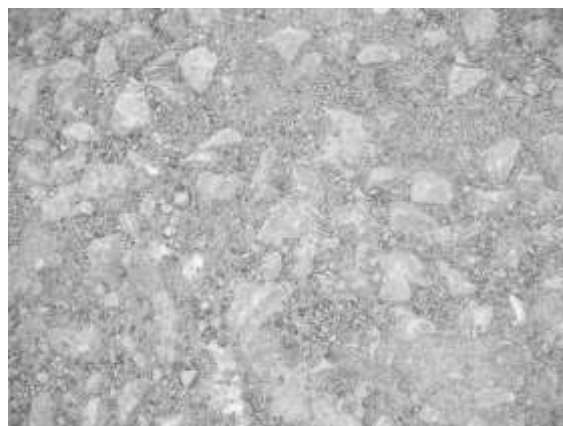
Εικόνα 7. Τμήμα δρόμου χωρίς ασφαλτόστρωση. Διάβρωση στα ακραία τμήματα



Εικόνα 8. Τμήμα δρόμου με ασφαλτόστρωση. Διάβρωση στα ακραία τμήματα



Εικόνα 9. Υγιές τμήμα στο κέντρο του δρόμου



Εικόνες 10, 11. Διαβρωμένο τμήμα του δρόμου



Εικόνα 12. Λακκούβα πριν από καθαρισμό
φερτών υλών



Εικόνα 13. Λακκούβα μετά από καθαρισμό
φερτών υλών

Αξίζει να σημειωθεί ότι το χαλαρό υλικό στις λακκούβες δεν είναι το αποτριμμένο, αλλά συσσωρευμένο φερτό υλικό αδρανών που μεταφέρονται με ανοικτά οχήματα (Εικόνες 12, 13). Στα άκρα του δρόμου υπάρχουν περιορισμένου αριθμού ρηγματώσεις (Εικόνα 14).



Εικόνα 14. Ρηγματώση στο άκρο του δρόμου



Εικόνα 15. Καλή εικόνα συμπύκνωσης

Αξιολογώντας την κατάσταση του δρόμου φαίνεται ότι το τμήμα με 4 εκατοστά ασφαλτόστρωση είναι σε καλύτερη κατάσταση. Το τμήμα με σκυρόδεμα πάσχει από απότριψη, κυρίως στα άκρα αριστερά-δεξιά, όπου η συνεχής διαβροχή από τα νερά του αρδευτικού σε συνδυασμό με τη φθορά από τα φερτά αδρανή έχουν συντελέσει στο να δημιουργηθούν αποφλοιώσεις. Δεν υπάρχουν εκτεταμένες ρηγματώσεις, αλλά σε ορισμένα μόνο σημεία στα άκρα. Επίσης, δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές γύρω από τους αρμούς.

Στο εσωτερικό του οδοστρώματος από σκυρόδεμα και γύρω από το κατά μήκος άξονα, όπως εμφανίστηκε από τη λήψη του πυρήνα, το σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ καλή εικόνα συμπίκνωσης (Εικόνα 15).

Θραύση καρώτων

Οι θέσεις δειγματοληψίας δίνονται στον Πίνακα 2, με σημείο αναφοράς τον αριθμό του αρμού με αρχή μέτρησης τον αρμό προς τη γέφυρα. Ο 6^{ος} και ο 9^{ος} αρμός στο τμήμα σκυροδέματος, ενώ ο 14^{ος}-15^{ος} αρμός στο τμήμα σκυροδέματος με ασφαλική επίστρωση. Τα αποτελέσματα της θραύσης των καρώτων φαίνονται στους Πίνακες 3, 4.

Πίνακας 2. Θέσεις δειγματοληψίας

Θέση δειγματοληψίας	Θέση κατά μήκος του άξονα του δρόμου	Απόσταση από το αριστερό άκρο του δρόμου
1	6 ^{ος} αρμός	1,00 m
2	6 ^{ος} αρμός	1,60 m
3	6 ^{ος} αρμός	2,10 m
4	9 ^{ος} αρμός	0,90 m
5	9 ^{ος} αρμός	1,30 m
6	9 ^{ος} αρμός	1,55 m
7	μεταξύ 14 ^{ου} και 15 ^{ου} αρμού	0,90 m
8	μεταξύ 14 ^{ου} και 15 ^{ου} αρμού	1,45 m
9	μεταξύ 14 ^{ου} και 15 ^{ου} αρμού	1,90 m

Πίνακας 3. Έλεγχος αντοχής σε θλίψη καρώτων

Θέση δειγματοληψίας	Δείγμα	D (cm)	h (cm)	P (kN)	σ (MPa)	Συντ. αναγωγής 15x30cm	Τελική αντοχή
1	2-άνω	4,85	8,95	31,9	17,27	1,3662	23,6
	2-κάτω	4,85	8,95	42,0	22,73	1,3662	31,1
	3-άνω	4,85	9,92	42,0	22,73	1,38	31,4
	3-κάτω	4,85	8,84	40,4	21,87	1,3662	29,9
2	4	9,28	15,96	125,0	18,48	1,1466	21,2
	5-άνω	4,85	9,34	40,8	22,08	1,38	30,5
	6-άνω	4,85	8,44	31,0	16,78	1,3524	22,7
	6-κάτω	4,85	8,22	18,6	10,07	1,3524	13,5
3	7	9,27	17,11	144,0	21,34	1,1583	24,7
	8-άνω	4,85	9,61	30,7	16,62	1,38	22,9
	8-κάτω	4,85	9,59	20,0	10,80	1,38	14,9
	9-άνω	4,85	9,81	22,2	12,02	1,38	16,6

Πίνακας 4. Αντοχή σε διάρρηξη και μέτρο ελαστικότητας καρώτων

Θέση δειγματοληψίας	Δείγμα	D (cm)	h (cm)	E _{st} (GPa)	E _d (GPa)	P _{διάρρηξης} (kN)	σ _δ (MPa)
1	1	9,31	6,69	-	41,7	30,60	3,13
2	4	9,28	15,96	21,5	48,6	-	-
	5-κάτω	4,85	5,61	-	-	5,30	1,24
3	7	9,27	17,11	23,9	49,4	-	-
	9-κάτω	4,85	8,99	-	-	9,40	1,37

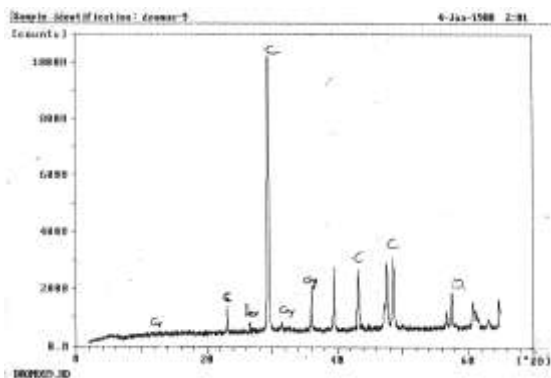
Με εξαίρεση ένα δείγμα με αντοχή 13,5 MPa που ήταν προβληματικό, στα άλλα η αντοχή κυμαίνεται από 22 έως 31 MPa, με ένα μέτρο ελαστικότητας 21-24 GPa και αντοχή σε διάρρηξη 1,3-3,0 MPa. Στο σκυρόδεμα με ασφαλοστρώση οι αντοχές είναι χαμηλότερες, 16,5-24,7 MPa, με μέτρο ελαστικότητας 23 GPa και αντοχή σε διάρρηξη 1,37 MPa. Παρόλο που οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές (δεν έχει ληφθεί ικανός αριθμός πυρήνων) επιτρέπουν μια πρώτη εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των οδοστρωμάτων που κατασκευάστηκαν. Είναι φανερό ότι η ασφαλική επικάλυψη επηρεάζει αισθητά την αντοχή σε απότριψη – δημιουργία λακκούβας στο οδόστρωμα σκυροδέματος. Κατά τη λήψη πυρήνων έγινε αποκόλληση της ασφαλικής στρώσης λόγω μη καλής πρόσφυσης κατά την εφαρμογή της.

Μέτρηση του pH, ορυκτολογική ανάλυση και μικροσκοπική εξέταση

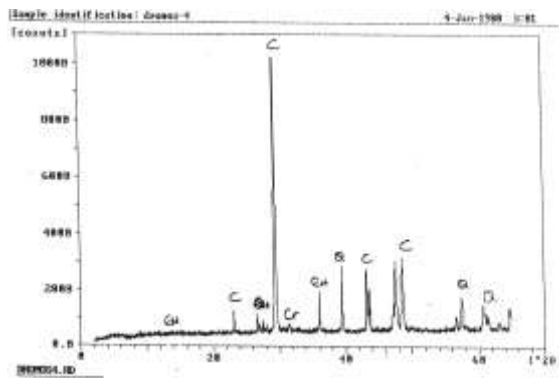
Στα δείγματα πυρήνων μετρήθηκε το pH σε τρία τμήματα: άνω, μέση, κάτω και οι τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5. Το pH των σκυροδεμάτων κυμαίνεται από 9,3 έως 10,4 και δε φαίνεται να διαφοροποιείται στο πάχος της στρώσης. Οι χαμηλές τιμές του pH αποδίδονται στη χρήση του υψηλού ποσοστού τέφρας ως συμπληρωματικής κονίας με το τσιμέντο.

Πίνακας 5. Τιμές pH και ποσοστό διαλυτών αλάτων

Θέση δειγματοληψίας 1				Θέση δειγματοληψίας 2				Θέση δειγματοληψίας 3			
Δείγμα	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Δείγμα	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Δείγμα	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
1-άνω	9,3	0,01	0,46	4-άνω	9,9	<0,01	1,32	7-άνω	9,8	<0,01	1,20
2-άνω	9,8	0,02	1,15	4-μέση	10,2	<0,01	1,06	7-μέση	10,0	0,02	1,13
2-μέση	10,1	0,01	1,23	4-κάτω	10,3	<0,01	1,10	7-κάτω	10,4	0,01	0,95
2-κάτω	10,2	0,05	0,92	5-άνω	10,0	<0,01	0,77	8-άνω	10,0	0,02	1,15
3-άνω	10,0	0,03	1,02	5-μέση	9,9	0,02	1,37	8-μέση	10,1	<0,01	1,06
3-μέση	10,0	0,02	1,15	5-κάτω	9,9	0,02	1,46	8-κάτω	10,2	0,02	1,20
3-κάτω	9,7	0,06	1,10	6-άνω	9,6	<0,01	0,95	9-άνω	10,2	<0,01	1,04
				6-μέση	9,6	0,01	0,95	9-μέση	10,1	0,02	1,04
				6-κάτω	9,6	<0,01	1,27	9-κάτω	10,0	0,02	0,89



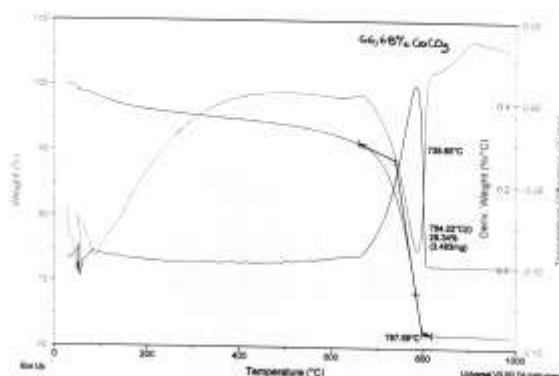
Εικόνα 16. X-ray diffraction – Δείγμα 9



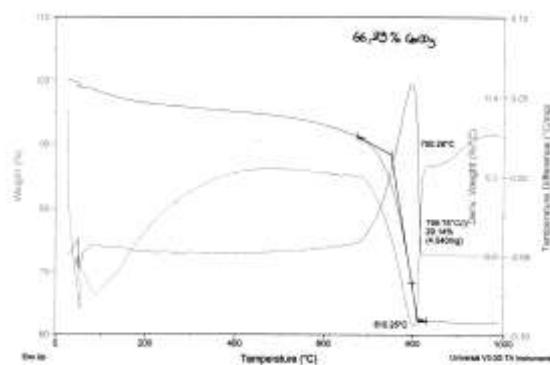
Εικόνα 17. X-ray diffraction – Δείγμα 4



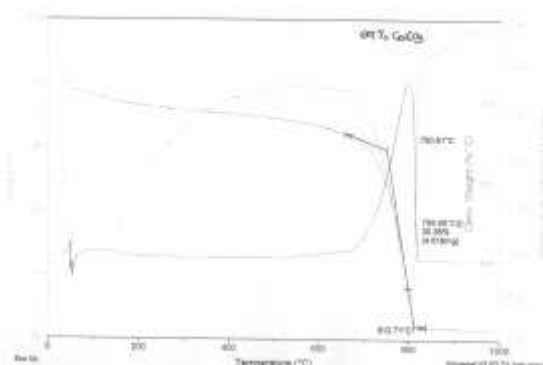
Εικόνα 18. Άλατα συγκεντρωμένα σε πόρους (στερεοσκόπιο x8)



Εικόνα 19. Θερμική ανάλυση DTA-TG-Δείγμα 2



Εικόνα 20. Θερμική ανάλυση DTA-TG-Δείγμα 3



Εικόνα 21. Θερμική ανάλυση DTA-TG-Δείγμα 4

Η ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων με ακτίνες X έδειξε ότι εκτός από ασβεστίτη και χαλαζία υπάρχουν ορυκτά με θειικά, όπως ανυδρίτης, γύψος, $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ (Glauberite), Na_2SO_4 (Thenardite) και ετρινγκίτης, όπως φαίνεται στις εικόνες 16, 17. Στη στερεοσκοπική παρατήρηση φαίνονται πόροι μέσα στους οποίους είναι συγκεντρωμένα θειικά άλατα υπό μορφή κρυστάλλων (Εικόνα 18). Η περιεκτικότητα σε θειικά άλατα κυμαίνεται από 0,46% έως 1,46% κατά βάρος του τσιμεντοπήγματος (Πίνακας 5). Στην ανάλυση των δειγμάτων με διαφορική θερμική ανάλυση DTA-TG δε φαίνεται να υπάρχει $\text{Ca}(\text{OH})_2$ παρά μόνο ασβεστίτης (Εικόνες 19, 20, 21). Αυτό ως γνωστό είναι ενδεικτικό της ισχυρής πουζολανικής δράσης της ιπτάμενης τέφρας.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την επιθεώρηση των κατασκευασθέντων τμημάτων σε συνδυασμό με το ιστορικό κατασκευής βγαίνει το συμπέρασμα ότι τα τσιμεντοτεφροσκυροδέματα συμπεριφέρθηκαν ικανοποιητικά. Οι τιμές αντοχής των πυρήνων είναι μέσα στις αναμενόμενες, καθώς και του μέτρου ελαστικότητας (στη διαστασιολόγηση έχει ληφθεί η τιμή $E_d = 20 \text{ GPa}$).

Η τέφρα λόγω των συστατικών της (ελεύθερο CaO , παρουσία θεικών πάνω από το επιτρεπόμενο όριο στους κανονισμούς τσιμέντου) δε φαίνεται να σχετίζεται με το κύριο πρόβλημα στο σκυρόδεμα των οδοστρωμάτων που είναι η απότριψη επιφάνειας, κυρίως στα άκρα του δρόμου. Η ασφαλική επικάλυψη, τέλος, λειτουργεί θετικά ως προς την προστασία από συνδυασμό απότριψης – έκπλυσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη Μαρία Στεφανίδου και τη Φωτεινή Καρκαντελίδου για τη βοήθειά τους στη διεξαγωγή των εργαστηριακών ελέγχων.

ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ε.Γ. Παπαδάκης, Μ.Π. Ευσταθίου

*Ε.Γ. Παπαδάκης & Συνεργ., Επιστημονικό Πάρκο Πατρών Α.Ε., Οδός Σταδίου, Πλατάνι, 26504
Πάτρα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό σχεδιασμού συνθέσεων σκυροδέματος και προβλέψεων ιδιοτήτων του, επιχειρείται μια ποσοτική συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων βιομηχανικών παραπροϊόντων ως προσθέτων σκυροδέματος (πυριτική και ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα, πυριτική παιπάλη) σχετικά με:

1. την αντοχή σκυροδέματος
2. την ενανθράκωση σκυροδέματος και την διάβρωση του οπλισμού
3. την διείδυση χλωριόντων και την διάβρωση του οπλισμού
4. το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος ολικού κύκλου ζωής της κατασκευής.

Από αυτήν την παραμετρική ανάλυση προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για την αξιοποίηση των υλικών αυτών στην βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα δόμησης.

Λέξεις κλειδιά: ανθεκτικότητα, αξιολόγηση, βιομηχανικά παραπροϊόντα, κόστος, σκυρόδεμα

A QUANTITATIVE COMPARATIVE ASSESSMENT OF VARIOUS INDUSTRIAL BY-PRODUCTS AS CONCRETE ADDITIONS

V.G. Papadakis, M.P. Efstathiou

V.G. Papadakis & Assoc., Patras Science Park S.A., Stadiou Str., Platani, 26504 Patras, Greece

ABSTRACT: In the present work, using an appropriate software for concrete mix design and properties prediction, a quantitative comparative assessment is undertaken about the use of various industrial by-products as concrete additions (siliceous and calcareous fly ash, silica fume) as regards:

1. the concrete strength
2. the concrete carbonation and the corrosion of its reinforcement
3. the chloride penetration in concrete and the corrosion of its reinforcement
4. the economical and environmental cost of the total life cycle of the construction.

From the present parametrical analysis, very significant results were derived as regards the exploitation of these materials on the sustainable development of the building sector.

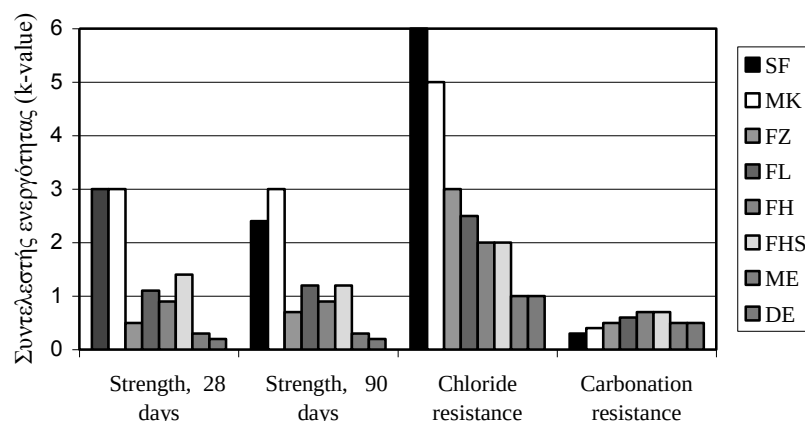
Keywords: assessment, concrete, cost, durability, industrial by-products

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας δόμησης στον Ελληνικό χώρο κατέχει πρωτεύουσα θέση στις γενικότερες βιομηχανικές/τεχνολογικές δραστηριότητες. Είναι η μεγαλύτερη βιομηχανία και στον ευρύτερο Ευρωπαϊκό χώρο, κύκλου εργασιών 800 δις. € ετησίως που αντιστοιχεί στο 11% του συνολικού Ευρωπαϊκού εισοδήματος, απασχολώντας περίπου το 20% του συνολικού εργατικού δυναμικού της ΕΕ (15). Αντίστοιχη είναι και η συμμετοχή του τομέα δόμησης στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος από πλευράς κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αερίων εκπομπών (κυρίως CO₂), στερεών αποβλήτων, κλπ. Την σημαντικότερη θέση στον τομέα δόμησης κατέχει η βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος (65% του εργατικού δυναμικού, 80% των αερίων εκπομπών). Τα παρακάτω τρία θέματα αιχμής απασχολούν κυρίως την βιομηχανία κατασκευών:

- ✓ Οι τεράστιες ανάγκες υποδομής της γρήγορης αστικοποίησης της κοινωνίας στον κόσμο.
- ✓ Η ανάγκη για μια ισορροπία ανάμεσα στη βιομηχανική ανάπτυξη και το περιβάλλον.
- ✓ Η κρίση στο χώρο της ανθεκτικότητας των κατασκευών και κυρίως του σκυροδέματος.

Η πλειονότητα των περιπτώσεων φθοράς σκυροδέματος σχετίζεται με την διάβρωση του οπλισμού, η οποία κυρίως οφείλεται σε ενανθράκωση ή διείσδυση χλωριόντων [1,2]. Από την άλλη πλευρά, είναι πλέον κοινός τόπος [3,4] ότι η βιώσιμη ανάπτυξη των βιομηχανιών τσιμέντου και σκυροδέματος μπορεί να επιτευχθεί με μεγιστοποίηση της χρήσης ποζολανικών και υδραυλικών παραπροϊόντων (*supplementary cementing materials: SCM*), όπως τέφρα, σκωρία, κλπ., παραγόμενων σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς και μεταλλουργικές βιομηχανίες. Εκτός από την επίδραση των υλικών αυτών σε συνήθεις δομικές ιδιότητες του σκυροδέματος, όπως αντοχή και σταθερότητα όγκου, η επίδραση στην ανθεκτικότητα πρέπει επίσης να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Σε προηγούμενες εργασίες [5-7] προτείνεται ένα απλοποιημένο σχήμα χημικών αντιδράσεων που περιγράφει την δράση της πυριτικής παιπάλης και της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα, δίνοντας επίσης ποσοτικές εκφράσεις εκτίμησης της χημικής και ογκομετρικής σύνθεσης ενός ποζολανικού σκυροδέματος. Έχει επίσης παρουσιασθεί [8-10], μια πρακτική προσέγγιση της επίδρασης των ποζολανικών υλικών στην αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας την έννοια του συντελεστή ενεργότητας k . Ο συντελεστής ενεργότητας k ορίζεται ως το μέρος της ποζολάνης που μπορεί να θεωρηθεί ως ισοδύναμο του τσιμέντου Portland παρέχοντας ίσες τιμές ιδιοτήτων με το σκυρόδεμα χωρίς ποζολάνη ($k=1$ για τσιμέντο Portland).



Σχήμα 1. Συντελεστές ενεργότητας για διάφορα SCM (SF: πυριτική παιπάλη, MK: μετακαολίνη, FZ: ιπτάμενη τέφρα με μηδενικό ασβέστιο, FL: πυριτική ιπτάμενη τέφρα, FH: ασβεστίτη ιπτάμενη τέφρα, FHS: ασβεστίτη ιπτάμενη τέφρα υψηλών θετικών, ME: Μηλαϊκή γη, και DE: γη διατόμων).

Στο Σχήμα 1 συνοψίζονται πειραματικές μετρήσεις του συντελεστή k για διάφορα βιομηχανικά παραπροϊόντα και φυσικές ποζολάνες, και για διάφορες ιδιότητες σύγκρισης (αντοχή, ανθεκτικότητα).

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό σχεδιασμού συνθέσεων σκυροδέματος και προβλέψεων ιδιοτήτων του, επιχειρείται μια περαιτέρω συγκριτική αξιολόγηση των σημαντικότερων βιομηχανικών παραπροϊόντων ως προσθέτων σκυροδέματος, σχετικά με τις ιδιότητες αντοχής, ανθεκτικότητας και κόστους που προσδίδουν στο σκυρόδεμα.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει δαπανηθεί μια τεράστια ποσότητα ενέργειας σε *εργαστηριακές και πειραματικές μελέτες* σε θέματα ανθεκτικότητας σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας είναι ακόμα είτε διασκορπισμένα σε επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων είτε αναφέρονται συνοπτικά σε εξειδικευμένα βιβλία. Επιπρόσθετα, θεωρητικές προσεγγίσεις των μηχανισμών φθοράς, με ισχυρά προβλεπτικό χαρακτήρα, είναι περιορισμένες σε κάποια πολύπλοκα και δύσχρηστα στην πράξη μαθηματικά μοντέλα.

Ένα σημαντικό βήμα προόδου σε αυτό το θέμα, συντελέστηκε σχετικά πρόσφατα [11,12], με την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού (*EUCON[®]*) για υπολογισμούς με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, που περιλαμβάνει τα πλέον αξιόπιστα και αποδεδειγμένα μοντέλα, ενισχυμένο με μια καλή βάση πειραματικών δεδομένων. Το λογισμικό, αυτό αναπτυγμένο σε φιλική προς τον χρήστη μορφή, καταρχήν ξεκινά με την κατάστροψη της *μελέτης σύνθεσης*, δηλαδή τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των συστατικών του σκυροδέματος, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη από το έργο *κατηγορία αντοχής* σκυροδέματος. Κατόπιν υπολογίζονται τα φυσικοχημικά εκείνα χαρακτηριστικά από τα οποία εξαρτάται ο ρυθμός των διεργασιών φθοράς. Στην συνέχεια και ανάλογα των περιβαλλοντικών συνθηκών (κατηγορίες έκθεσης) προσδιορίζεται ο ρυθμός προόδου των μηχανισμών φθοράς που αφορούν αυτό το περιβάλλον, και τελικά εκτιμάται η *διάρκεια χρήσιμης ζωής της κατασκευής*. Τέλος, δίνονται *στοιχεία κόστους*, αλλά και περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ώστε να είναι δυνατή μια τεchnοοικονομική βελτιστοποίηση. Οι κύριοι μηχανισμοί φθοράς που εξετάζονται είναι η διάβρωση του οπλισμού προκαλούμενη είτε από ενανθράκωση είτε από διείσδυση χλωριόντων (θαλάσσιου νερού ή άλλων πηγών), και η χημική προσβολή (οξέων, θεικών και αλκαλίων). Έχουν χρησιμοποιηθεί βασικές θεμελιώδεις αρχές Χημικής Μηχανικής και Μηχανικής Υλικών ώστε να προσομοιωθούν οι φυσικοχημικές διεργασίες μέσω μαθηματικών μοντέλων για σχεδιασμό και πρόβλεψη. Η δομή του βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τα Ευρωπαϊκά Πρότυπα για το τσιμέντο EN 197 (27 διαφορετικοί τύποι τσιμέντου) και για το σκυρόδεμα EN 206 (επιπλέον χρήση προσθέτων όπως ιπτάμενη τέφρα και πυριτική παιπάλη, χρήση βελτιωτικών ή χημικών προσμίκτων, κλπ.).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Πρόγραμμα παραμετρικής ανάλυσης

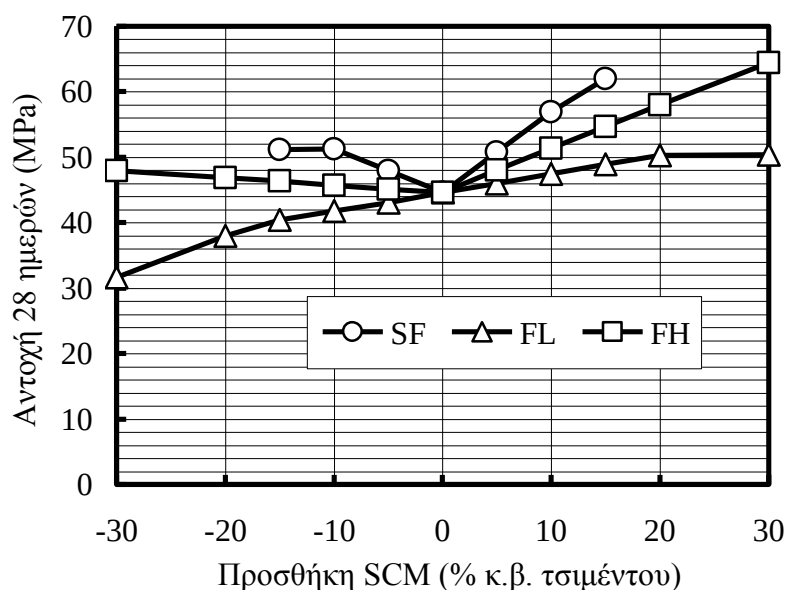
Χρησιμοποιώντας το ανωτέρω λογισμικό διεξάγουμε στην συνέχεια μια παραμετρική ανάλυση σχετικά με την επίδραση του είδους και της ποσότητας προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Πρέπει να τονισθεί ότι οι προβλέψεις του ανωτέρω λογισμικού έχουν εκτενώς επιβεβαιωθεί από πειραματικές μετρήσεις, για συγκεκριμένα όρια παραμέτρων, και η συγκριτική αξιολόγηση που επιχειρείται στην παρούσα εργασία κινείται εντός αυτών των ορίων.

Πίνακας 1 Τυπική ανάλυση οξειδίων (%) και δραστικού πυριτίου (%), κλίνκερ πόρτλαντ, πυριτικής παιπάλης, ιπτάμενων τεφρών και σκωρίας υψικαμίνου.

Υδραυλικά/ ποζολανικά υλικά	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Ενεργ. πυρίτιο
Κλίνκερ πόρτλαντ	23	6	3	65	0.5	-
Πυριτική παιπάλη (SF)	91	1	1.5	0.7	0.4	96
Πυριτική ιπτάμενη τέφρα (FL)	53	20	9	4	0.6	82
Ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα (FH)	39	16	6	24	4.3	71

Μία σταθερή μονάδα όγκου (1 m³) σκυροδέματος επιλέχθηκε ως κοινή βάση σύγκρισης. Όταν ένα SCM προστίθεται σε αυτήν την μονάδα τότε ίσος όγκος (και περίπου ίση μάζα) από ένα άλλο υλικό, είτε τσιμέντο είτε αδρανή, αφαιρούνται ώστε να διατηρείται σταθερός ο συνολικός όγκος (το ποσοστά αντικατάστασης ήταν από ±5 - ±30% επί του τσιμέντου αναφοράς). Η περιεκτικότητα σε νερό, W= 150 kg/m³, έμεινε πάντα σταθερή σε όλες τις συνθέσεις.

Ως βάση σύγκρισης (σκυρόδεμα αναφοράς) θεωρείται ένα σκυρόδεμα με περιεκτικότητα C= 300 kg/m³ σε τσιμέντο τύπου CEM I 42,5N, με περιεκτικότητα σε νερό W= 150 kg/m³, με θραυστά, ασβεστολιθικά αδρανή μέγιστου κόκκου 31.5 mm, χωρίς πρόσθετα, και με περιεκτικότητα σε παγιδευμένο αέρα 1.5%. Ως βασικά SCM για σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν τρία τυπικά ποζολανικά / υδραυλικά υλικά, μια τυπική πυριτική παιπάλη (*silica fume*: SF) που χρησιμοποιείται αρκετά σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, μια πυριτική ιπτάμενη τέφρα, ιδιαιτέρως χαμηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (FL) που επίσης χρησιμοποιείται ευρέως σε αρκετές Ευρωπαϊκές χώρες (κατά EN-450), και μία ιπτάμενη τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (FH), *Ελληνικού τύπου*, όπως αυτές που παράγονται π.χ. στον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας. Μια τυπική περιεκτικότητα σε οξείδια που υποθετικά περιέχονται στα ανωτέρω υλικά δίνεται στον Πίνακα 1.



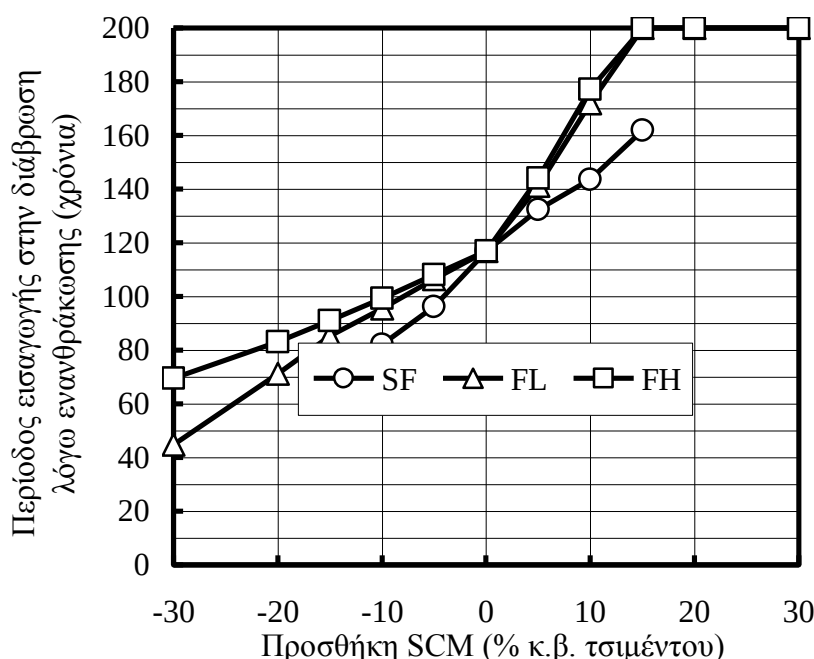
Σχήμα 2. Συγκριτικά αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής 28 ημερών, έναντι διαφόρων ποσοστών προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Το δεξιό μέρος αναφέρεται στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών από ποζολάνες και το αριστερό στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από ποζολάνες.

Σύγκριση ως προς την αντοχή

Τυπικά αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής δίνονται στο Σχήμα 2. Γενικά παρατηρείται ότι όταν τα ποζολανικά υλικά αντικαθιστούν αδρανή επιτυγχάνονται υψηλότερες αντοχές. Η τελική αύξηση της αντοχής είναι ανάλογη του ποσοστού δραστικού SiO_2 στην ποζολάνη (με την SF να απογειώνει τις αντοχές). Όταν αντικαθίσταται τσιμέντο από αυτά τα υλικά (μέχρι ενός σημείου) η τελική αντοχή ξεπερνά την αντοχή του δοκιμίου αναφοράς μόνον εάν το ποσοστό δραστικού πυριτίου στην ποζολάνη είναι μεγαλύτερο από αυτό του τσιμέντου. Για την Ελληνική ιπτάμενη τέφρα (FH), επειδή οι τιμές του k είναι περίπου στην μονάδα (1) κατά τις πρώιμες ηλικίες, αυτό σημαίνει ότι, τουλάχιστον μέχρι ενός ορίου [7], αυτή η συγκεκριμένη τέφρα, αφού αλεσθεί, μπορεί να αντικαταστήσει τσιμέντο Portland, δίνοντας ίδιες αντοχές.

Σύγκριση ως προς την ενανθράκωση

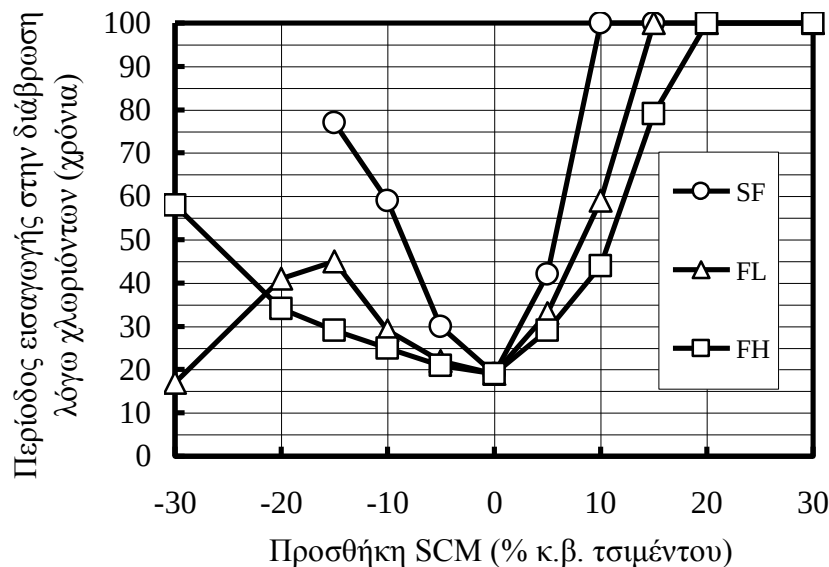
Τυπικά αποτελέσματα υπολογισμού της περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση (αποπαθητικοποίησης) του οπλισμού λόγω ενανθράκωσης δίνονται στο Σχήμα 3. Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η περίοδος, τόσο μακρύτερη είναι η προστασία του οπλισμού έναντι διάβρωσης, μάλιστα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κατώτερο όριο χρήσιμης ζωής. Για τα παρόντα ποζολανικά υλικά το βάθος ενανθράκωσης μειώνεται καθώς αυξάνει η αντικατάσταση αδρανών από ποζολάνη και αυξάνει καθώς αυξάνει η αντικατάσταση τσιμέντου από ποζολάνη. Έτσι αντίστοιχα η περίοδος εισαγωγής στην διάβρωση επιμηκύνεται στην πρώτη περίπτωση, ενώ στην δεύτερη μειώνεται δραστικά. Συγκρίνοντας επίσης την σχετική συμπεριφορά για αντικατάσταση 10% είτε σε τσιμέντο είτε σε αδρανή παρατηρείται ότι η FH παρουσιάζει την μεγαλύτερη προστασία (λόγω ίδιας σημαντικής περιεκτικότητας σε ασβέστιο), ενώ η SF την χαμηλότερη.



Σχήμα 3. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση οπλισμού λόγω ενανθράκωσης (κατηγορία έκθεσης περιβάλλοντος: XC3, αστική περιοχή, επικάλυψη οπλισμού: 30mm), έναντι διαφόρων ποσοστών προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Το δεξιό μέρος αναφέρεται στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών από ποζολάνες και το αριστερό στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από ποζολάνες.

Σύγκριση ως προς την διείσδυση χλωριόντων

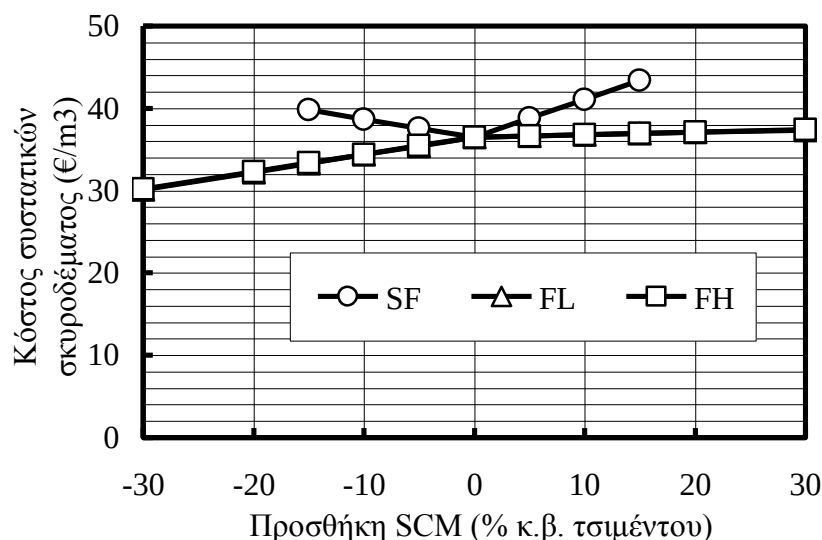
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4, οι συνθέσεις σκυροδέματος που περιέχουν ποζολάνες είτε αυτές αντικαθιστούν αδρανή είτε τσιμέντο (μέχρι ενός ορίου) παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη περίοδο εισαγωγής στην διάβρωση του οπλισμού λόγω διείσδυσης χλωριόντων. Από όλα τα υλικά που δοκιμάστηκαν η SF παρουσίασε την μεγαλύτερη αντίσταση έναντι διείσδυσης χλωριόντων, κατόπιν η FL και τέλος η FH. Αυτή η συμπεριφορά, που αντικατοπτρίζεται επίσης στις σημαντικά υψηλότερες τιμές του k συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες για αντοχή (Σχ. 1), μπορεί να εξηγηθεί λόγω των σημαντικών αλληλεπιδράσεων των χλωριόντων με τα ένυδρα συστατικά του άμορφου πυριτίου των ποζολανικών υλικών [8].



Σχήμα 4. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση οπλισμού λόγω διείσδυσης χλωριόντων (κατηγορία έκθεσης περιβάλλοντος: XS2, Μεσόγειος Θάλασσα, επικάλυψη οπλισμού: 40mm), έναντι διαφόρων ποσοστών προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Το δεξιό μέρος αναφέρεται στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών από ποζολάνες και το αριστερό στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από ποζολάνες.

Σύγκριση ως προς το κόστος των πρώτων υλών

Τέλος, στο Σχήμα 5 δίνεται μια συγκριτική εικόνα του συνολικού κόστους α' υλών που συνθέτουν 1 m³ σκυροδέματος, στις ανωτέρω περιπτώσεις προσθήκης διαφόρων SCM. Παρατηρείται ότι το κόστος παραμένει περίπου ίδιο στην περίπτωση επιπλέον προσθήκης τεφρών (αντικαθιστώντας μόνον αδρανή) και ελαφρά μεγαλύτερο όταν γίνεται η αντίστοιχη προσθήκη πυριτικής παιπάλης. Όμως, αυτή η ελαφρά αύξηση κόστους πρώτων υλών, μακροπρόθεσμα εξισορροπείται και ανατρέπεται λόγω της επιμήκυνσης της χρήσιμης ζωής της κατασκευής (σημαντική αύξηση των περιόδων εισαγωγής στην διάβρωση λόγω ενανθράκωσης ή διείσδυσης χλωριόντων). Επιπλέον το παραγόμενο σκυρόδεμα αποκτά και υψηλότερες αντοχές. Στην περίπτωση αυτή έχουμε σημαντικό περιβαλλοντικό κέρδος λόγω της εξαιρετικής ανθεκτικότητας των κατασκευών και της δραστηκής μείωσης των συνεχών επισκευών και ίσως των ολικών αντικαταστάσεων των κατασκευών.



Σχήμα 5. Συγκριτικά αποτελέσματα υπολογισμού κόστους αξίας α' υλών σκυροδέματος, έναντι διαφόρων ποσοστών προσθήκης SCM σε σκυρόδεμα. Το δεξιό μέρος αναφέρεται στην περίπτωση αντικατάστασης αδρανών από ποζολάνες και το αριστερό στην περίπτωση αντικατάστασης τσιμέντου από ποζολάνες.

Η αντικατάσταση τσιμέντου από ιπτάμενες τέφρες μειώνει αφενός το οικονομικό κόστος των κατασκευών (στην περίπτωση της πυριτικής παιπάλης το κόστος και πάλι αυξάνεται λόγω της υψηλότερης τιμής της), και μειώνει επίσης αναλογικά το περιβαλλοντικό κόστος των α' υλών. Εάν επίσης η κατασκευή υποτεθεί ότι εκτίθεται σε περιβάλλον χλωριόντων, η αντικατάσταση αυτή οδηγεί σε σημαντική επιμήκυνση της χρήσιμης ζωής και άρα σε περαιτέρω μείωση του συνολικού οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους του κύκλου ζωής της κατασκευής.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αρκετά στερεά βιομηχανικά παραπροϊόντα θερμικών κατεργασιών (τέφρες από εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή καύσης αποβλήτων, σκωρίες από μεταλλουργικές διεργασίες, κλπ.) μπορούν να χαρακτηρισθούν ως *δευτερεύοντα υδραυλικά υλικά: SCM*. Η μεγιστοποίηση της χρήσης των υλικών αυτών θα βοηθήσει σημαντικά στην βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα δομικών έργων, μειώνοντας παράλληλα το κόστος κατασκευής. Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας κατάλληλο λογισμικό, σχετικά με την δράση των υλικών αυτών στο σκυρόδεμα και την επίδρασή τους στην αντοχή και την ανθεκτικότητά του σε διάρκεια (αντίσταση σε ενανθράκωση και διείσδυση χλωριόντων).

Όταν αυτά τα υλικά αντικαθιστούν αδρανή επιτυγχάνονται υψηλότερες αντοχές. Η τελική αύξηση της αντοχής είναι ανάλογη του ποσοστού δραστικού πυριτίου στην ποζολάνη. Όταν αντικαθίσταται τσιμέντο από αυτά τα υλικά (μέχρι ενός σημείου), η τελικά αντοχή ξεπερνά την αντοχή του δοκιμίου αναφοράς μόνον εάν το ποσοστό δραστικού πυριτίου στην ποζολάνη είναι μεγαλύτερο από αυτό του τσιμέντου. Την καλύτερη συμπεριφορά δίνει η πυριτική παιπάλη, κατόπιν η τέφρα υψηλού ασβεστίου και τέλος η τέφρα χαμηλού ασβεστίου. Η Ελληνική ιπτάμενη τέφρα υψηλού ασβεστίου, αφού αλεσθεί, μπορεί να αντικαταστήσει τσιμέντο Portland, μέχρι ενός ορίου, δίνοντας παρόμοιες αντοχές με αυτό.

Δείχθηκε επίσης ότι για όλες τις ποζολάνες που μελετήθηκαν σε αυτήν την εργασία, η περίοδος εισαγωγής στην διάβρωση οπλισμού λόγω ενανθράκωσης αυξάνεται, καθώς αυξάνει η αντικατάσταση αδρανών από ποζολάνη, και μειώνεται καθώς αυξάνει η αντικατάσταση τσιμέντου από ποζολάνη. Την καλύτερη συμπεριφορά δίνει η τέφρα υψηλού ασβεστίου, κατόπιν η τέφρα χαμηλού ασβεστίου και τέλος η πυριτική παιπάλη (όσο υψηλότερο ασβέστιο, τόσο καλύτερα). Οι συνθέσεις που περιείχαν ποζολάνη, ανεξάρτητα εάν αντικαθιστούσε αδρανή ή τσιμέντο παρουσίασαν σημαντική αύξηση της περιόδου εισαγωγής στην διάβρωση λόγω διείδυσης χλωριόντων. Την καλύτερη συμπεριφορά δίνει η πυριτική παιπάλη, κατόπιν η τέφρα χαμηλού ασβεστίου και τέλος η τέφρα υψηλού ασβεστίου (όσο υψηλότερο πυρίτιο, τόσο καλύτερα).

Η αντικατάσταση αδρανών από τέτοια βιομηχανικά παραπροϊόντα μπορεί να αυξήσει ελαφρώς το κόστος α' υλών, όμως η ασύγκριτα υψηλότερη ανθεκτικότητα και αντοχή που προσφέρει στις κατασκευές, οδηγεί σε σημαντική μείωση του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους του ολικού κύκλου ζωής των. Επίσης, κάτω από προϋποθέσεις, η αντικατάσταση τσιμέντου από ποζολάνες δίνει επιμήκυνση του χρόνου ζωής (περίπτωση διείδυσης χλωριόντων), με αναλογική επιπλέον μείωση του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους των α' υλών. Εάν στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιηθεί στην σύνθεση σκυροδέματος χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό, τότε πράγματι προκύπτει ένα συνολικά ανθεκτικό, οικονομικό, και ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον, σκυρόδεμα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Basheer, P.A.M., Chidiac, S.E., and Long, A.E., 1996. Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures, *Constr. Build. Mater.*, Vol. 10, p. 27.
2. Thompson, N.G., and Lankard, D.R., 1997. *Improved Concretes for Corrosion Resistance*, Georgetown Pike, McLean VA, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-96-207.
3. Mehta, P.K., 1998. Role of Pozzolanic and Cementitious Material in Sustainable Development of the Concrete Industry, *Proceedings of the 6th International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Bangkok, ACI SP-178, p. 1.
4. Berry, E.E., and Malhotra, V.M., 1987. Fly Ash in Concrete, in: *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, Ed. V.M. Malhotra, CANMET SP-86-8E, p. 35, Ottawa.
5. Papadakis, V.G., 1999. Experimental Investigation and Theoretical Modeling of Silica Fume Activity in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, p. 79.
6. Papadakis, V.G., 1999. Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems. Part I: Low-calcium Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, p. 1727.
7. Papadakis, V.G., 2000. Effect of Fly Ash on Portland Cement Systems. Part II: High-Calcium Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30(10), 1647-1654
8. V. G. Papadakis, 2000, Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30(2), 291.
9. Papadakis, V.G. and S. Tsimas, 2002. Supplementary Cementing Materials in Concrete - Part I: Efficiency and Design, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32(10), 1525-1532.
10. Badogiannis, E., V.G. Papadakis, E. Chaniotakis, and S. Tsivilis, 2004. Exploitation of Poor Greek Kaolins: Strength Development of Metakaolin Concrete and Evaluation by means of k-value, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34(6), 1035-1041.
11. Papadakis, V.G. and M.P. Efstathiou, 2005. EUCON: Computer Software for Estimation of Concrete Service Life, Patras Science Park S.A., Patras, Greece.
12. Papadakis, V.G., 2005. Estimation of Concrete Service Life – The Theoretical Background, Patras Science Park S.A., Patras, Greece.

ΜΕΛΕΤΗ ΕΨΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΦΑΡΙΝΑΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΕΙ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΑ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΑ

Χ.-Τ. Γκαλμπένης, Α. Μιχαλίτση, Σ. Τσίμας

*Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη
Ζωγράφου, Τ.Κ. 15773*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η δυνατότητα αξιοποίησης οικοδομικών απορριμμάτων στη βιομηχανία τσιμέντου, ως υποκατάστατων των φυσικών πρώτων υλών. Για τον σκοπό αυτό ένα δείγμα αναφοράς (βιομηχανική φαρίνα) και πέντε τροποποιημένα δείγματα που περιέχουν οικοδομικά απορρίμματα σε ποσοστό 20, 40, 60, 80 και 100%, παρασκευάστηκαν και υποβλήθηκαν σε θερμική κατεργασία σε διάφορες θερμοκρασίες από 1000°C έως 1450°C. Η επίδραση των οικοδομικών απορριμμάτων στην εψησιμότητα των διαφόρων συνθέσεων αποτιμήθηκε με βάση το ποσοστό της ελευθέρως ασβέστου (fCaO) που παρέμενε στα δείγματα με το πέρας της θερμικής κατεργασίας καθώς και από τον υπολογισμό των δεικτών εψησιμότητας. Τα προϊόντα της έψησης στους 1450°C (κλίνκερ) εξετάστηκαν ως προς την ορυκτολογική τους σύσταση με Περίθλαση Ακτίνων Χ (XRD). Τα αποτελέσματα της ανωτέρω μελέτης κατέδειξαν ότι η προσθήκη των οικοδομικών απορριμμάτων συμβάλλει στην βελτίωση της εψησιμότητας των διαφόρων συνθέσεων της φαρίνας του τσιμέντου ενώ τόσο η δομή όσο και οι ιδιότητες των παραγόμενων κλίνκερ δεν διαφοροποιούνται σε σχέση με το κλίνκερ που προκύπτει από την βιομηχανική φαρίνα.

Λέξεις κλειδιά: φαρίνα τσιμέντου, ανακυκλωμένα αδρανή σκυροδέματος, ανακυκλωμένα αδρανή τοιχοποιίας, μελέτη εψησιμότητας, κλίνκερ τσιμέντου

BURNABILITY STUDY OF CEMENT RAW MEAL INCORPORATING CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES

C.-T. Galbenis, A. Michalitsi, S. Tsimas

*School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9,
Zografou Campus, GR-15773*

ABSTRACT: The aim of the present study is the exploitation of Construction and Demolition (C&D) wastes in cement industry, as substitutes of natural raw materials. For that purpose, one reference cement raw meal obtained from the cement industry, and five modified mixtures which contained C&D wastes in a percentage of 20, 40, 60, 80 and 100%, were prepared and sintered at various temperatures from 1000°C to 1450°C. The effect on the reactivity of the generated mixtures, was evaluated on the basis of the free lime content (fCaO) in the mixtures sintered at the above temperatures as well as of the burnability capacities determination. The produced clinkers sintered at 1450°C were examined by means of mineralogical analysis (XRD). The results of the above study indicated that the addition of C&D wastes contribute to the burnability improvement of all modified raw meals while the formation and the properties of the produced clinkers are not varied relative to the reference sample.

Keywords: cement raw meal, recycled concrete aggregates, recycled masonry aggregates, burnability study, clinker cement

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οικοδομικά απορρίμματα αποτελούν μεγάλο μέρος του συνόλου των στερεών απορριμμάτων στις περισσότερες αστικές περιοχές. Σημαντικές ποσότητες προκύπτουν καθημερινά από οικοδομικές εργασίες κάθε είδους, έργα τεχνικών υποδομών, εκσκαφές και φυσικές ή τεχνολογικές καταστροφές [1,2]. Τα απορρίμματα που παράγονται από τις ανωτέρω δραστηριότητες είναι σχεδόν στο σύνολό τους αδρανή υλικά, δηλαδή υλικά τα οποία δεν υφίστανται καμία σημαντική χημική, φυσική ή βιολογική μετατροπή και για αυτόν τον λόγο μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα φιλικά προς το περιβάλλον [1]. Ο κύριος όγκος των οικοδομικών απορριμμάτων αποτελείται από σκυρόδεμα, υλικά τοιχοποιίας (τούβλα, κονιάματα), άσφαλτο, γυαλί, ξύλο, πλαστικό, χάλυβα, αλουμίνιο κλπ [2,3]. Τα υλικά αυτά είναι ανακυκλώσιμα και επομένως μπορούν να οδηγηθούν σε μονάδες ανακύκλωσης παρέχοντας νέα εκμεταλλεύσιμα δομικά υλικά.

Από την άλλη πλευρά, το ενδιαφέρον των τσιμεντοβιομηχανιών στη χρήση εναλλακτικών υλικών για αντικατάσταση μέρους των συμβατικών πρώτων υλών ολοένα και αυξάνεται. Διάφορες εναλλακτικές πρώτες ύλες, κυρίως παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών, έχουν προταθεί για τον ανωτέρω σκοπό. Σύμφωνα με βιβλιογραφικά δεδομένα [4,5,6], χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι η ερυθρά ιλύς, η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία υψικαμίνων, η τέφρα φλοιού ρυζιού κ.α. Η αξιοποίηση των προαναφερθέντων παραπροϊόντων επιτρέπει στις βιομηχανίες τσιμέντου να διαδραματίσουν κυρίαρχο ρόλο στην ανακύκλωσή τους ενώ παράλληλα συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των εξορυσσόμενων φυσικών πρώτων υλών.

Σημείο προβληματισμού της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η δυνατότητα αξιοποίησης των οικοδομικών απορριμμάτων, ως υποκατάστατων των φυσικών πρώτων υλών, στη βιομηχανία τσιμέντου. Έμφαση δόθηκε στον χημικό και ορυκτολογικό χαρακτηρισμό και στον προσδιορισμό των κατάλληλων αναλογιών ανάμιξης των πρώτων υλών. Ακολούθησε μελέτη εψησιμότητας των προκυπτουσών συνθέσεων φαρίνας στη θερμοκρασιακή περιοχή από 1000°C έως 1450°C ενώ μελετήθηκε η δομή των παραγόμενων κλίνκερ (1450°C) προκειμένου να διασφαλιστεί η ολοκλήρωση της διαδικασίας της έψησης.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

Πρώτες ύλες και μέθοδοι προσδιορισμού της σύστασής τους

Τα οικοδομικά απορρίμματα που μελετήθηκαν είναι τα Ανακυκλωμένα Αδρανή Σκυροδέματος (ΑΑΣ) και τα Ανακυκλωμένα Αδρανή Τοιχοποιίας (ΑΑΤ), που προέρχονται από εργασίες κατεδάφισης κτιρίων. Η συλλογή των ΑΑΣ και ΑΑΤ έγινε από μονάδα ανακύκλωσης αδρανών υλικών με έδρα το Σχιστό Κορυδαλλού. Τα ΑΑΣ συλλέχθηκαν στο κλάσμα 0-8mm ενώ το κλάσμα συλλογής των ΑΑΤ ήταν >32mm. Επίσης συλλέχθηκε επαρκής ποσότητα φαρίνας τσιμέντου από γνωστή ελληνική τσιμεντοβιομηχανία. Η Βιομηχανική Φαρίνα (ΒΦ) παρουσίασε υπόλειμμα στο κόσκινο των 90μm περίπου 12%. Για την επίτευξη των επόμενων βημάτων της παρούσας εργασίας (προσδιορισμός σύστασης πρώτων υλών και συνθέσεων φαρίνας τσιμέντου), επαρκής ποσότητα ΑΑΣ και ΑΑΤ

λειτουργιβήθηκε σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο τύπου Bond, προκειμένου να αποκτήσουν ενιαία λεπτότητα με την ΒΦ.

Για τον προσδιορισμό της σύστασης των πρώτων υλών πραγματοποιήθηκε χημική και ορυκτολογική ανάλυση. Η χημική ανάλυση έγινε με τη βοήθεια φασματοφωτόμετρου φθορισμού ακτίνων Χ (X-Ray Fluorescence - XRF) ενώ για τον εντοπισμό των κύριων ορυκτολογικών φάσεων σε κρυσταλλική μορφή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της περίθλασης με ακτίνες Χ (X-Ray Diffraction - XRD).

Προσδιορισμός συνθέσεων φαρίνας τσιμέντου

Για τον προσδιορισμό των αναλογιών ανάμιξης της ΒΦ με τα ΑΑΣ και τα ΑΑΤ, τηρήθηκαν όλοι οι προβλεπόμενοι περιορισμοί που τίθενται από τον κύριους δείκτες (Πυριτικός δείκτης - Sm, Αργίλικός Δείκτης - Am, Βαθμός κορεσμού σε άσβεστο - LSF, και Υδραυλικός δείκτης - Hm) των πρώτων υλών και από την ορυκτολογική σύσταση των παραγόμενων κλίνκερ με βάση τους τύπους του Bogue. Ο προσδιορισμός των συνθέσεων των πρώτων υλών έγινε με τη βοήθεια υπολογιστικού προγράμματος με σκοπό την παραγωγή τελικών προϊόντων (κλίνκερ) με τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία.

Η παρούσα μελέτη προέβλεπε την εργαστηριακή παρασκευή πέντε συνθέσεων φαρίνας τσιμέντου. Η ΒΦ αποτέλεσε την φαρίνα αναφοράς για τις υπόλοιπες συνθέσεις (Φ1, Φ2, Φ3, Φ4, Φ5), οι οποίες περιείχαν οικοδομικά απορρίμματα σε ποσοστό 20, 40, 60, 80 και 100% αντίστοιχα. Για την παρασκευή όλων των συνθέσεων, οι πρώτες ύλες αναμίχθηκαν προς πλήρη ομογενοποίησή τους σε εργαστηριακό σφαιρόμυλο. Ο έλεγχος της ομοιογένειας του μίγματος των πρώτων υλών, πραγματοποιήθηκε με την συνήθη μέθοδο δειγματοληψίας κόνεων (1 gr) και υπολογισμό της απώλειας πύρωσής τους στους 1000°C για μία ώρα. Με το πέρας της διαδικασίας ομογενοποίησης, το υπόλειμμα στα 90μm όλων των συνθέσεων (συμπεριλαμβανομένης και της ΒΦ) παρέμεινε ενιαίο (περίπου 7%).

Μελέτη εψησιμότητας και παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου

Η μελέτη εψησιμότητας των προκυπτουσών συνθέσεων περιελάμβανε την θερμική τους κατεργασία στις ακόλουθες θερμοκρασίες: 1000°C, 1100°C, 1200°C, 1300°C, 1350°C, 1400°C και 1450°C. Πριν την έψηση, όλες οι φαρίνες μορφοποιήθηκαν με τη προσθήκη απιονισμένου νερού σε σφαιρίδια διαμέτρου μέχρι 2cm και ξηράνθηκαν στους 105°C για 24h. Οι μορφοποιημένες φαρίνες τοποθετήθηκαν σε κάψες από λευκόχρυσο (Pt) και εισήχθησαν σε προγραμματιζόμενο φούρνο υψηλών θερμοκρασιών στην επιθυμητή θερμοκρασία για 45min ώστε να διασφαλιστεί η ολοκλήρωση της έψησης. Με το πέρας των 45min, τα δείγματα εξήλθαν από τον φούρνο και ψύχθηκαν ταχέως με τη βοήθεια ψυχρού ρεύματος από μηχανικό ανεμιστήρα για την αποφυγή σχηματισμού ανεπιθύμητων ορυκτολογικών φάσεων (γ-C₂S).

Η αποτίμηση της εψησιμότητας έγινε με βάση το ποσοστό της ελευθέρας ασβέστου (fCaO) που δεν αντέδρασε με κάποια από τα ορυκτολογικά συστατικά των παραγόμενων προϊόντων στις ανωτέρω θερμοκρασίες έψησης. Ο προσδιορισμός του fCaO έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 114-03. Από τι μετρούμενες τιμές fCaO έγινε εξαγωγή των δεικτών εψησιμότητας (Burnability Capacity - BC) σύμφωνα με τις σχέσεις (1), (2), και (3) [6]:

$$BC_1 = \frac{600}{C} \quad (1)$$

$$C = fCaO_{1000^{\circ}C} + 2fCaO_{1100^{\circ}C} + 2fCaO_{1200^{\circ}C} + 3fCaO_{1300^{\circ}C} + 4fCaO_{1350^{\circ}C} + 4fCaO_{1400^{\circ}C} + 2fCaO_{1450^{\circ}C} \quad (2)$$

$$BC_2 = \frac{3,75g(fCaO_{1350^{\circ}C} + fCaO_{1400^{\circ}C} + 2fCaO_{1450^{\circ}C})}{\sqrt[4]{fCaO_{1350^{\circ}C}}} \quad (3)$$

Τέλος, για να διασφαλιστεί η ολοκλήρωση της έψησης, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διερεύνηση της δομής των προϊόντων έψησης στους 1450°C (παραγόμενα κλίνκερ), η οποία έγινε με περίθλαση ακτίνων X (XRD).

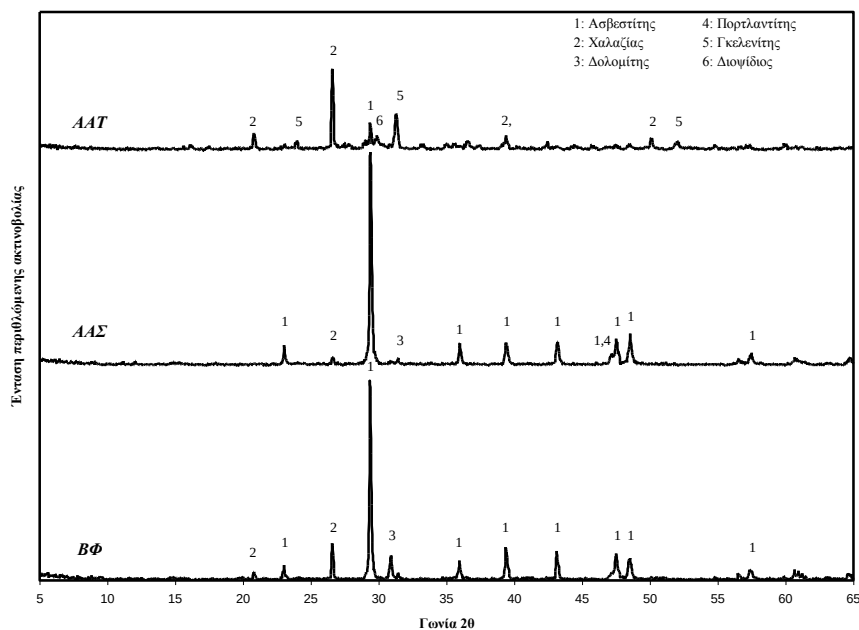
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Χημική και ορυκτολογική σύσταση πρώτων υλών

Τα αποτελέσματα των χημικών και ορυκτολογικών αναλύσεων των δειγμάτων ΑΑΣ, ΑΑΤ και ΒΦ παρατίθενται στον Πίνακα 1 και στο Σχήμα 1 αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Χημική σύσταση ΑΑΣ, ΑΑΤ και ΒΦ (% κ.β.)

Συστατικό	ΑΑΣ	ΑΑΤ	ΒΦ
SiO ₂	4,78	44,59	13,55
Al ₂ O ₃	1,32	9,70	3,31
Fe ₂ O ₃	0,67	4,58	2,55
CaO	46,19	26,77	41,95
MgO	1,29	2,31	1,98
K ₂ O	0,11	0	0,41
Απώλεια Πύρωσης	40,36	9,14	35,12



Σχήμα 1. Ακτινοδιάγράμματα XRD δειγμάτων ΑΑΣ, ΑΑΤ και ΒΦ

Από την χημική και ορυκτολογική ανάλυση των εξεταζόμενων πρώτων υλών, καταδεικνύεται η χαρακτηριστική ομοιότητα της σύστασης των ΑΑΣ και ΑΑΤ με την σύσταση της ΒΦ. Η ασβεστολιθική και πυριτική, κατά βάση, προέλευση των ΑΑΣ και ΑΑΤ αντίστοιχα, βρίσκεται σε πλήρη ταύτιση με την σύσταση της ΒΦ. Άλλωστε, αυτή η ομοιότητα αποτέλεσε και το πρωταρχικό κριτήριο για την εισαγωγή των συγκεκριμένων υλικών στο μίγμα των πρώτων υλών για την παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου.

Αξιολόγηση υπολογιστικού προσδιορισμού συνθέσεων φαρίνας

Τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προσδιορισμού α) των αναλογιών ανάμιξης των πρώτων υλών, β) των κύριων δεικτών των πρώτων υλών και γ) της ορυκτολογικής σύστασης κατά Bogue των παραγόμενων κλίνκερ, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 που ακολουθεί:

Πίνακας 2. Υπολογιστικός προσδιορισμός αναλογιών ανάμιξης και τιμών κύριων δεικτών πρώτων υλών καθώς και ορυκτολογικής σύστασης κατά Bogue των παραγόμενων κλίνκερ.

Συνθέσεις φαρίνας τσιμέντου	Αναλογία ανάμιξης πρώτων υλών (% κ.β.)			Κύριοι δείκτες πρώτων υλών				Ορυκτολογική σύσταση κλίνκερ κατά Bogue (% κ.β.)			
	ΒΦ	ΑΑΣ	ΑΑΤ	LSF	Sm	Am	Hm	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
ΒΦ	100	0	0	0.96	2,31	1,3	2,16	65,01	11,21	6,91	12,03
Φ1	80	15	5	0.95	2,41	1,41	2,15	61,38	14,74	7,44	11,14
Φ2	60	31	9	0.96	2,51	1,52	2,2	64,94	11,40	7,76	10,12
Φ3	40	46	14	0.95	2,64	1,67	2,18	61,32	14,91	8,28	9,23
Φ4	20	62	18	0.97	2,75	1,84	2,24	64,86	11,58	8,60	8,21
Φ5	0	77	23	0.95	2,89	2,07	2,22	61,25	15,09	9,12	7,33

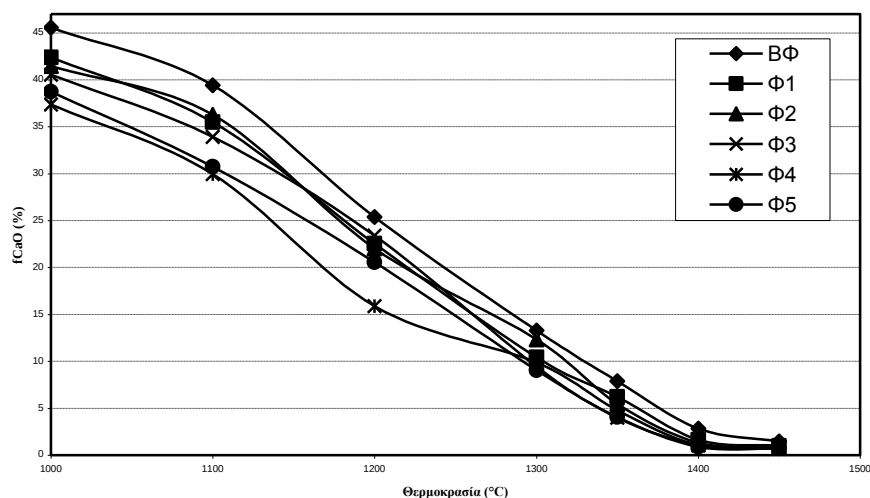
Όπως προκύπτει από την αξιολόγηση του Πίνακα 2, το ποσοστό της υποκατάστασης της ΒΦ από τα ανακυκλωμένα αδρανή δύναται να είναι ακόμη και 100%. Αναφορικά με τους κύριους δείκτες των πρώτων υλών, η τιμή του δείκτη LSF σχεδιάστηκε έτσι ώστε να παραμένει σταθερή σε όλες τις συνθέσεις καθώς καθορίζει σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα του κλίνκερ που προκύπτει από την διαδικασία έψησης της φαρίνας. Οι τιμές των δεικτών Sm και Am αυξάνονται με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ, ενώ ο δείκτης Hm παραμένει σταθερός. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές όλων των δεκτών παραμένουν εντός των συνήθων ορίων τους. Σε σχέση με την ορυκτολογική σύσταση κατά Bogue του παραγόμενου κλίνκερ, παρατηρήθηκε ότι τα ποσοστά των C₃S και C₂S αυξομειώνονται δυσανάλογα, με το άθροισμα τους να παραμένει σχεδόν σταθερό. Το ποσοστό των C₃A και C₄AF αυξάνεται και μειώνεται αντίστοιχα, με την αύξηση του ποσοστού υποκατάστασης της ΒΦ. Τα διαστήματα τιμών των ορυκτολογικής φάσεων του κλίνκερ κρίνονται αποδεκτά σε κάθε περίπτωση.

Αποτίμηση εψησιμότητας και μελέτη δομής κλίνκερ

Στον Πίνακα 3 δίνονται οι τιμές του fCaO που προσδιορίστηκαν στις προβλεπόμενες θερμοκρασίες έψησης καθώς και οι υπολογισθέντες δείκτες εψησιμότητας για το σύνολο των συνθέσεων που εξετάστηκαν. Στο Σχήμα 2 αποδίδονται διαγραμματικά μερικά από τα δεδομένα του Πίνακα 3.

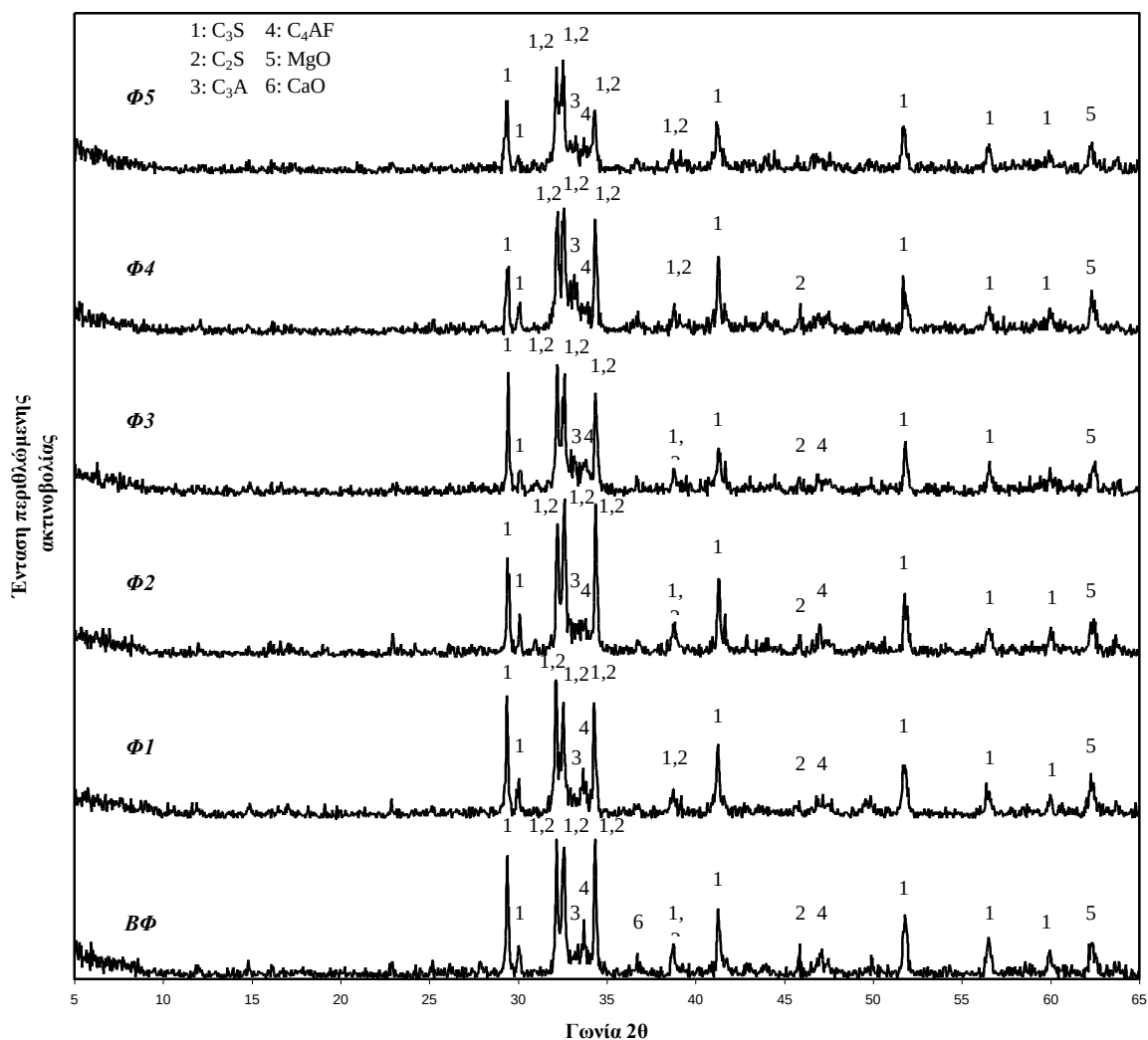
Πίνακας 3. Τιμές fCaO (%) και δεικτών εψησιμότητας

Συνθέσεις φαρίνας τσιμέντου	fCaO (%)							BC ₁	BC ₂
	Θερμοκρασία (°C)								
	1450	1400	1350	1300	1200	1100	1000		
ΒΦ	1,469	2,845	7,905	13,302	25,375	39,42	45,57	2,30	25,97
Φ1	0,986	1,637	6,206	10,428	22,56	35,478	42,38	2,69	23,72
Φ2	0,817	1,324	5,475	12,341	22,036	36,266	41,469	2,68	23,10
Φ3	0,677	1,073	4,004	9,421	23,387	33,901	40,557	2,93	24,09
Φ4	0,733	1,072	4,792	9,882	15,881	29,96	37,367	3,27	22,94
Φ5	0,705	0,875	4,058	9,05	20,557	30,747	38,734	3,16	23,45



Σχήμα 2. Τιμές fCaO σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία έψησης των εξεταζόμενων συνθέσεων

Από τα δεδομένα του Πίνακα 3 και του Σχήματος 2 προκύπτει ότι σε κάθε περίπτωση η εισαγωγή των εξεταζόμενων οικοδομικών απορριμμάτων στη ΒΦ βελτιώνει την έψηση σε σχέση με την έψηση της ΒΦ. Η μείωση των τιμών του fCaO σε όλες τις θερμοκρασίες είναι αξιοσημείωτη για το σύνολο των συνθέσεων. Ο δείκτης BC₁, που καλύπτει την πορεία της έψησης σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών (1000-1450°C), εμφανίζεται σε όλες τις φαρίνες αισθητά μεγαλύτερος σε σχέση με τη ΒΦ, γεγονός που υποδηλώνει την βελτίωση της εψησιμότητας σε κάθε περίπτωση. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και από τις τιμές του δείκτη BC₂, που λαμβάνει υπόψη την πορεία έψησης στις υψηλές θερμοκρασίες (1350-1450°C), όπου παρατηρείται μείωση της τιμής του σε κάθε περίπτωση σε σχέση με τη ΒΦ. Μία πιθανή εξήγηση αναφορικά με την βελτίωση της εψησιμότητας που επιτυγχάνεται με την εισαγωγή των ΑΑΣ και ΑΑΤ στο μίγμα των πρώτων υλών, είναι ότι τα ανακυκλωμένα αδρανή συνίστανται από υλικά, όπως τούβλα και τσιμέντο, τα οποία έχουν ήδη υποστεί θερμική κατεργασία σε υψηλές θερμοκρασίες και επομένως δεν απαιτούν περισσότερη ενέργεια σε αυτές τις θερμοκρασίες. Το τελευταίο στάδιο αυτής της εργασίας προέβλεπε την μελέτη της δομής των παραγόμενων προϊόντων έψησης στους 1450°C (κλίνκερ) προκειμένου να διασφαλιστεί η διαδικασία ολοκλήρωσης της έψησης. Η δομή των παραγόμενων κλίνκερ μελετήθηκε με XRD και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στα ακτινοδιαγράμματα του Σχήματος 3 που ακολουθεί.



Σχήμα 3. Ακτινοδιαγράμματα κλίνκερ τσιμέντου

Από τα ανωτέρω ακτινοδιαγράμματα, παρατηρείται ότι σε όλες τις συνθέσεις οι κύριες ορυκτολογικές φάσεις (C₃S, C₂S, C₃A και C₄AF) των παραγόμενων κλίνκερ έχουν σχηματιστεί πλήρως. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η προσθήκη των ΑΑΣ και ΑΑΤ δεν επηρεάζει την ορυκτολογική σύσταση των προκυπτουσών κλίνκερ. Επιπρόσθετα, πιστοποιείται η ολοκλήρωση της έψησης στο σύνολο των δειγμάτων. Τα αποτελέσματα της μελέτης εψησιμότητας βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τον ορυκτολογικό χαρακτηρισμό των κλίνκερ αναφορικά με την παρουσία του fCaO. Συγκεκριμένα, υψηλότερες κορυφές CaO παρατηρούνται στο δείγμα που προέρχεται από την ΒΦ σε σχέση με τα δείγματα που προέρχονται από την υποκατάσταση της ΒΦ από ΑΑΣ και ΑΑΤ.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η πιθανή αξιοποίηση των οικοδομικών απορριμμάτων στη βιομηχανία τσιμέντου, ως υποκατάστατων των φυσικών πρώτων υλών. Τα βασικότερα συμπεράσματα που εξάγονται συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία:

- ✓ Η ασβεστολιθική και πυριτική σύσταση των δειγμάτων ΑΑΣ και ΑΑΤ βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με την σύσταση των φυσικών πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τσιμέντου. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την συμβατότητα των υπο εξέταση υλικών στο μίγμα των πρώτων υλών.
- ✓ Από τον υπολογιστικό προσδιορισμό των αναλογιών ανάμιξης των ΑΑΣ και ΑΑΤ με τη ΒΦ προέκυψε ότι τα εξεταζόμενα υλικά θα μπορούσαν να υποκαταστήσουν την ΒΦ ακόμη και σε ποσοστό 100%. Σε κάθε περίπτωση τόσο οι τιμές των κύριων δεικτών των πρώτων υλών όσο και η ορυκτολογική σύσταση κατά Bogue των προκυπτουσών κλίνκερ βρίσκονται εντός των συνήθων ορίων τους.
- ✓ Η μελέτη εψησιμότητας κατέδειξε την βελτίωση της εψησιμότητας όλων των συνθέσεων που περιείχαν τα οικοδομικά απορρίμματα σε σχέση με τη ΒΦ. Σε όλες τις προβλεπόμενες θερμοκρασίες έψησης, οι τιμές του fCaO ήταν αισθητά μικρότερες για όλες τις συνθέσεις.
- ✓ Η βελτίωση της έψησης στις συνθέσεις που περιείχαν οικοδομικά απορρίμματα επιβεβαιώθηκε και από την εξαγωγή των δεικτών εψησιμότητας (BC₁, BC₂).
- ✓ Η ολοκλήρωση της διαδικασίας της έψησης διασφαλίστηκε από τον πλήρη σχηματισμό των κύριων ορυκτολογικών φάσεων (C₃S, C₂S, C₃A και C₄AF) των προϊόντων έψησης στους 1450°C (κλίνκερ). Το γεγονός αυτό φανερώνει ότι η προσθήκη ΑΑΣ και ΑΑΤ δεν επηρεάζει την δομή των παραγόμενων κλίνκερ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος «ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ Ι: Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο» (ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ), το οποίο συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς Πόρους (25%).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Symonds Group Ltd (1999) “Construction and Demolition management practices and their economic impacts”, Brussels.
2. Fatta D., A. Papadopoulos, E. Avramikos, E. Sgourou, K. Moustakas, F. Kourmoussis, A. Mentzis and M. Loizidou (2003) “Generation and management of Construction and Demolition waste in Greece - An existing challenge”, Resources, Conservation and Recycling, Volume 40, pp81-91.
3. Oikonomou N. (2004) “Recycled concrete aggregates”, Cement and Concrete Composites, Volume 27, pp. 315-318.
4. J.I. Bhatti, F. MacGrecor Miller, S.H. Kosmatka, Innovations in Portland Cement Manufacturing, Portland Cement Association, USA.

5. P.E Tsakiridis, S. Agatzini-Leonardou and P. Oustadakis (2004) "Red mud addition in the raw meal for the production Portland cement clinker", Journal of Hazardous Materials, Volume 116, pp.103-110.
6. G. Kakali, S.Tsivilis, K.Kolovos, K. Choupa, T.Perraki, M. Perraki, M. Stamatakis and Gh. Vasilatos (2003) "Use of secondary mineralizing raw materials in cement production. The case study of stibnite ore", Materials Letters, Volume 57, pp.3117-3123.

ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΑΣ ΩΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ε. Αναστασίου, Ι. Παπαγιάννη

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος, καθώς και άλλων ερευνητικών εργασιών που διεξάχθηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών έχει αποδειχθεί ότι τα αποκαμινεύματα χαλυβουργίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή για την παραγωγή σκυροδέματος και μάλιστα ειδικών εφαρμογών. Στην προσπάθεια αξιοποίησης των σκωριών αυτών παρουσιάζονται οι υπάρχοντες σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο σχετικοί κανονισμοί και γίνεται μια αξιολόγηση των ελληνικών σκωριών με βάση τα όρια που προδιαγράφονται σε αυτούς και με τα κριτήρια αποτελεσματικότητας που προέκυψαν από πιλοτικές εφαρμογές στη χώρα μας.

Λέξεις κλειδιά: βιομηχανικά παραπροϊόντα, ελληνικές σκωρίες χαλυβουργίας, κανονισμοί σκυροδέματος..

STANDARDS FOR THE USE OF STEEL INDUSTRY BY-PRODUCTS AS AGGREGATES FOR THE PRODUCTION OF CONCRETE

E. Anastasiou, I. Papayianni

Laboratory of Building Materials, Aristotle University of Thessaloniki.

ABSTRACT: In the framework of a research programme, as well as other research projects undertaken by the Laboratory of Building Materials of the Aristotle University of Thessaloniki, it has been demonstrated that steel slags can be used as aggregates in concrete and especially in concrete of advanced properties. In an effort to fully exploit the available slags the available European and International Standards are presented and an evaluation of the greek slags is attempted, based on the criteria set by these Standards and along with the performance-based criteria derived from demonstration projects in Greece.

Keywords: industrial by-products, steel slag, standards

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο στόχος του κανονιστικού πλαισίου για τη χρήση υλικών στη δόμηση είναι κυρίως η ασφάλεια των κατασκευών και γενικότερα η αποφυγή αστοχιών που μπορεί να οφείλονται στο υλικό και στη συνεργασία του με άλλα υλικά δόμησης. Οι κανονισμοί που διέπουν τη χρήση ενός υλικού αποτελούν συλλογικό προϊόν συνεργασίας ομάδας ειδικών επιστημόνων και βασίζονται κυρίως στη συσσωρευμένη εμπειρία. Συνήθως έπονται των εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιείται ήδη το υλικό. Η κάλυψη που προσφέρει το κανονιστικό πλαίσιο στη διακίνηση ενός δομικού προϊόντος είναι απαραίτητη για την προώθηση του υλικού. Εντούτοις υπάρχουν πολλά καινοτόμα προϊόντα των οποίων η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα επιτυχημένη και τα οποία δεν έχουν την κάλυψη κανονιστικού πλαισίου. Οι κανονισμοί μπορεί να αναφέρονται σε γενικές και ειδικές απαιτήσεις. Στην περίπτωση της χρήσης των σκωριών χάλυβα ως αδρανών για την παραγωγή σκυροδέματος υπάρχουν οι γενικές απαιτήσεις που αφορούν στα αδρανή υλικά για σκυρόδεμα και οι ειδικές απαιτήσεις που αφορούν στα σκυροδέματα συγκεκριμένων απαιτήσεων. Λόγω της φύσης των αδρανών μπορεί επίσης να εισάγονται ιδιαίτεροι έλεγχοι.

Η χρήση των σκωριών, παραπροϊόντων της βιομηχανίας σιδήρου (blast furnace slag), ως αδρανών για σκυρόδεμα είναι γνωστή στον Ευρωπαϊκό χώρο για περισσότερο από 30 χρόνια εφ' όσον σχετικοί κανονισμοί εκδίδονται ήδη το 1974 (BS 1047: Air cooled blast furnace slag used as coarse aggregate for concrete) όπου αναφέρονται ειδικές απαιτήσεις όσον αφορά την περιεκτικότητα σε διαλυτά θειικά και τη σταθερότητα όγκου. Οι σκωρίες που παράγονται κατά την παραγωγή χάλυβα (steel slag) διαφέρουν ως προς τη σύσταση κυρίως όσον αφορά την περιεκτικότητα σε Fe_2O_3 , τη σχέση $\text{SiO}_2 / \text{CaO}$ και είναι συγκριτικά μεγαλύτερου ειδικού βάρους. Μπορούν να χαρακτηριστούν –σε αντίθεση με τα blast furnace slag αδρανή– ως αδρανή βαρέων σκυροδεμάτων. Ειδικός κανονισμός για τη χρήση σκωριών χάλυβα ως αδρανών στο σκυρόδεμα δεν υπάρχει. Εν τούτοις η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους στο σκυρόδεμα με τεχνολογικά και οικολογικά οφέλη έχει διερευνηθεί παγκοσμίως από πολλούς ερευνητές [1], [2], [3].

ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΑΔΡΑΝΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι απαιτήσεις για να χρησιμοποιηθεί ένα κοκκώδες υλικό ως αδρανές σε σκυροδέματα προδιαγράφονται στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12620: Aggregates for Concrete και το EN 13242: Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction. Στο πρότυπο EN 206: Manual for concrete Practice συμπεριλαμβάνονται επίσης άρθρα που αφορούν τα αδρανή. Σχετικοί με τις απαιτήσεις αδρανών για σκυρόδεμα είναι και οι κανονισμοί ASTM C33: Concrete Aggregates, ASTM C637: Aggregates for Radiation-Shielding Concrete, με τις μεθόδους δοκιμασίας που περιγράφονται στο ASTM Annual Book of ASTM Standards Volume 04.02.

Εν σχέσει με τους κανονισμούς που αφορούν στη χρήση κοκκωδών υλικών ως αδρανών σε ασφαλτομίγματα όπως είναι το πρότυπο EN 13043: Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads airfields and other trafficked areas, η διαφοροποίηση είναι ότι στα πρότυπα EN 12620 και prEN 13242 οι σκωρίες χάλυβα ενσωματώνονται μέσα στο πηγματισμέντου, ένα πηγμα μέγιστης συνδετικής ικανότητας με επαρκή ανθεκτικότητα και σταθερότητα στο χρόνο.

Στους παραγράφους περί σκοπιμότητας και ορισμού των παραπάνω προτύπων (EN 12620, EN 13242) καθορίζονται ως αδρανή τα κοκκώδη υλικά που προκύπτουν από την επεξεργασία φυσικών

ή βιομηχανικά παρασκευασμένων ή και ανακυκλωμένων υλικών που έχουν ξηρή πυκνότητα κόκκων μεγαλύτερη από $2,0 \text{ kg/m}^3$ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σκυροδέμα συνήθων κατασκευών που εμπίπτουν στο EN 206-1 πρότυπο ή σε δρόμους, δάπεδα ή άλλα προϊόντα προκατασκευασμένου σκυροδέματος.

Εξ ορισμού λοιπόν τα αδρανή σκωρίας χάλυβα εμπίπτουν στα πρότυπα εφ' όσον κατά τον έλεγχο πληρούνται οι απαιτήσεις που προδιαγράφονται σε αυτά. Σχετικά με τις δοκιμασίες με τις οποίες ελέγχεται εάν πληρούνται οι απαιτήσεις δίνεται ο κατάλογος των σχετικών προτύπων στο Παράρτημα.

Κοκκομετρία

Το μέγεθος των κόκκων των αδρανών σκωρίας χάλυβα καθορίζεται με θραύση και διαχωρισμό (με κόσκινα) του πρωτογενούς συλλεγόμενου υλικού. Βάσει των προτύπων ο διαχωρισμός σε χονδρόκοκα και λεπτόκοκα ή ανάμικτα γίνεται με το μέγεθος των κόσκινων κατώτερου (d) και μεγαλύτερου (D) (Πίνακες 1, 2).

Βάσει των πινάκων των προτύπων η κοκκομετρία των σκωριών χάλυβα μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να εμπίπτει στις κατηγορίες των προτύπων και δεν αποτελεί πρόβλημα (Διάγραμμα 1).

Πίνακας 1. Κοκκομετρικές απαιτήσεις αδρανών σύμφωνα με τον EN 12620

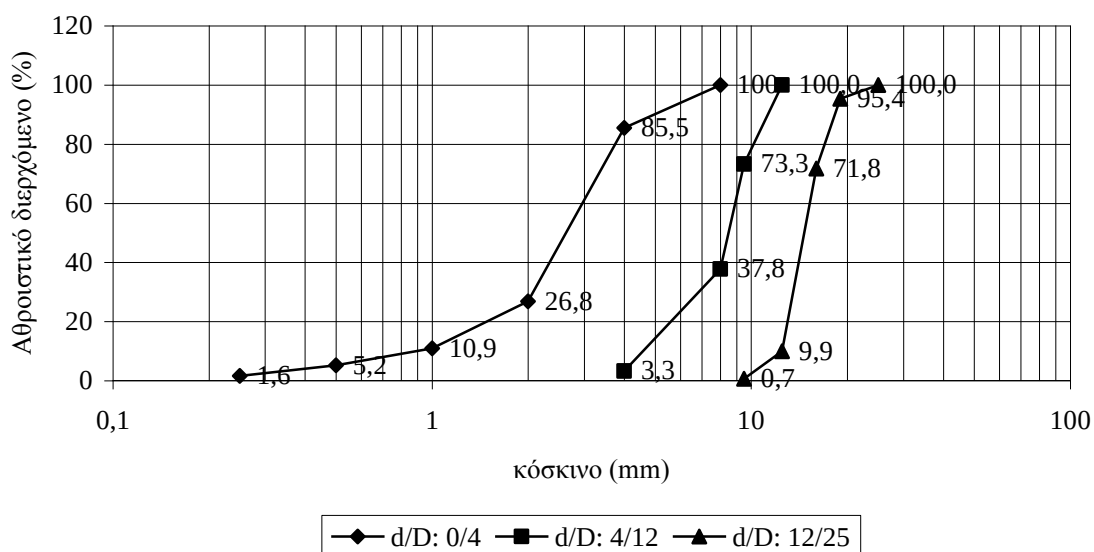
Αδρανές	Μέγεθος*	Αθροιστικό διερχόμενο % κ.ο.					Κατηγορία G
		$2D$	$1,4D$	D	d	$d/2$	
Χονδρόκοκκο	$D/d \leq 2$ ή $D \leq 11,2\text{mm}$	100	98-100	85-99	0-20	0-5	$G_{c85/20}$
		100	98-100	80-99	0-20	0-5	$G_{c80/20}$
	$D/d > 2$ και $D > 11,2\text{mm}$	100	98-100	90-99	0-15	0-5	$G_{c90/15}$
Λεπτόκοκκο	$D \leq 4\text{mm}$ και $d=0$	100	95-100	85-99	-	-	G_F85
Φυσικής διαβάθμισης 0-8	$D = 8\text{mm}$ και $d = 0$	100	98-100	90-99	-	-	G_{NG90}
Μονής διαβάθμισης (all-in)	$D \leq 45\text{mm}$ και $d=0$	100	95-100	85-99	-	-	G_F85

* όπου D και d η μέγιστη και ελάχιστη αντίστοιχα ονομαστική διάσταση του κλάσματος αδρανών

Πίνακας 2. Κοκκομετρικές απαιτήσεις αδρανών σύμφωνα με τον EN 13242

Αδρανές	Μέγεθος* (mm)	Αθροιστικό διερχόμενο % κ.ο.					Κατηγορία G
		$2D$	$1,4D$	D	d	$d/2$	
Χονδρόκοκκο	$d \geq 1$ και $D > 2$	100	98-100	85-99	0-15	0-5	G_{c85-15}
		100	98-100	80-99	0-20	0-5	G_{c80-20}
Λεπτόκοκκο	$d = 0$ και $D \leq 6,3$	100	98-100	85-99	-	-	G_F85
		100	98-100	80-99	-	-	G_F80
Μονής διαβάθμισης (all-in)	$D \leq 45\text{mm}$ και $d = 0$	100	98-100	90-99	-	-	G_A90
		100	98-100	85-99	-	-	G_A85

* όπου D και d η μέγιστη και ελάχιστη αντίστοιχα ονομαστική διάσταση του κλάσματος αδρανών



Διάγραμμα 1. Ενδεικτικές κοκκομετρικές καμπύλες τριών κλασμάτων αδρανών σκωρίας ονομαστικής διάστασης d/D 0/4, 4/12 και 12/25

Μορφολογικά Χαρακτηριστικά

Ο EN 12620 καθορίζει τις απαιτήσεις για δείκτη πλακοειδούς (flakiness index) και για το ποσοστό των λεπτόκοκκων που διέρχονται από το κόσκινο των 63μm. Μετά από εργαστηριακό έλεγχο τα αδρανή σκωρίας έδωσαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 3. Αξίζει να σημειωθεί πως και στις δύο περιπτώσεις η σκωρία εμπίπτει στις ελάχιστες (δηλαδή βέλτιστες) αντίστοιχες κατηγορίες.

Πίνακας 3. Μορφολογικά χαρακτηριστικά αδρανών σκωρίας

Έλεγχος	Κλάσμα	Αποτέλεσμα	Κατηγορία/απαίτηση	
			κατά EN12620	κατά EN13242
Δείκτης πλακοειδούς	Χονδρόκοκκο	8%	FI_{15}	FI_{20}
Αθροιστικό διερχόμενο % κ.ο. από το κόσκινο 63μm	Χονδρόκοκκο	0,2%	$f_{1,5}$	f_2
	Λεπτόκοκκο	1,0%	f_3	f_3

Φυσικές Ιδιότητες των αδρανών

Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από την προέλευση, τη δομή και τα επιφανειακά χαρακτηριστικά των κόκκων και είναι:

- η ανθεκτικότητα σε θρυμματισμό κατά Los Angeles
- η ανθεκτικότητα σε επιφανειακή τριβή (AAV)
- η αντοχή σε κρούση
- η ανθεκτικότητα σε τριβή (Micro – Deval)
- η ανθεκτικότητα σε τριβή από ελαστικές ρόδες

Οι προδιαγραφές των δοκιμασιών αναφέρονται στα πρότυπα του παραρτήματος. Για τα αδρανή σκωρίας που ελέγχθηκαν, τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Φυσικές ιδιότητες των αδρανών

Έλεγχος	Αποτέλεσμα	Κατηγορία/απαίτηση κατά	
		EN12620	EN13242
Φαιν. Ειδική Πυκνότητα λεπτόκοκκου	3,330	> 2,0	> 2,0
Φαιν. Ειδική Πυκνότητα χονδρόκοκκου	3,333		
Πυκν. Μονάδας Όγκου	1,562	-	-
Υδαταπορρόφηση	1,3%	WA ₂₄ 2	WA ₂₄ 2
Τριβή και κρούση κατά Los Angeles	13,32%	LA ₁₅	LA ₂₀
Λείανση (PSV)*	64	PSV ₆₂	δεν απαιτείται
Απότριψη (AAV)*	3	AAV ₁₀	δεν απαιτείται

Σε όλους τους ελέγχους τα αποτελέσματα είναι εντός των ορίων των κανονισμών και μάλιστα στις καλύτερες δυνατές κατηγορίες. Στον EN 12620 απαιτείται επίσης έλεγχος χονδρόκοκκων αδρανών σε ψύξη-απόψυξη, αλκάλιο-πυριτική δραστηριότητα και συστολή ξήρανσης. Για μέγιστη ανθεκτικότητα σε ψύξη-απόψυξη δίνονται στον ίδιο κανονισμό στους πίνακες 18 και 19 τιμές για ψύξη-απόψυξη και ανθεκτικότητα σε θειικό μαγνήσιο. Σύμφωνα με τον EN 13242 και την παράγραφο 7.3 που αφορά την ανθεκτικότητα των αδρανών, για κατηγορία υδαταπορρόφησης WA₂₄ 2 δεν απαιτείται έλεγχος και το αδρανές θεωρείται ανθεκτικό σε ψύξη-απόψυξη. Οι υπόλοιποι έλεγχοι έχουν γίνει μόνο στο σκυρόδεμα που κατασκευάστηκε με αυτά τα αδρανή και προτείνεται να γίνουν μελλοντικά στο πλαίσιο πιστοποίησης των αδρανών σκωρίας χάλυβα.

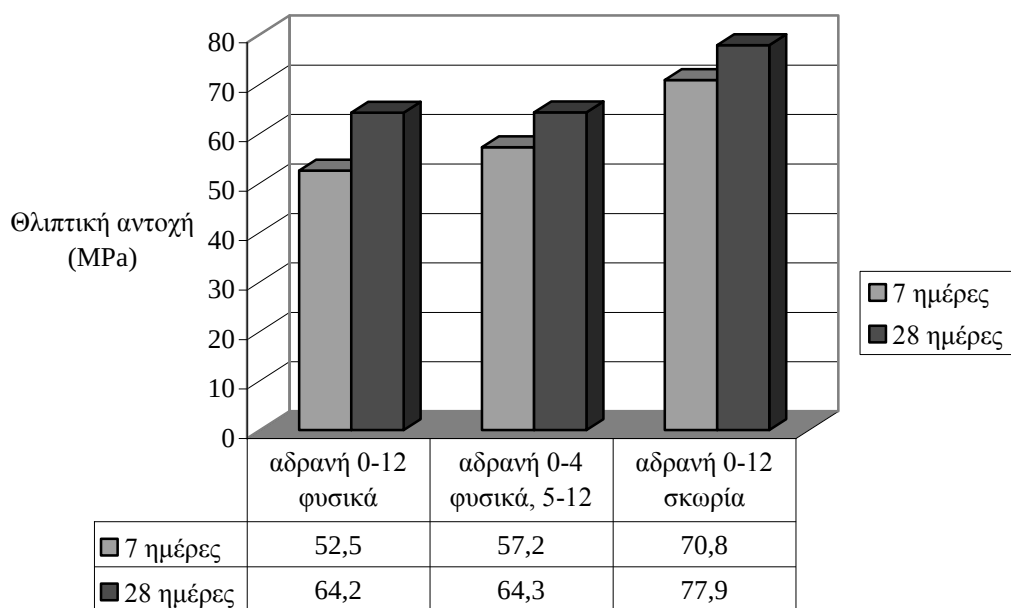
Χημικές απαιτήσεις

Σύμφωνα με τους κανονισμούς απαιτείται η μέτρηση της περιεκτικότητας των αδρανών σε χλωριούδια και θειικά και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξάχθηκαν δίνονται στον Πίνακα 5. Και στα δύο πρότυπα περιλαμβάνεται ο έλεγχος παρουσίας βλαπτικών για την ενυδάτωση και σκλήρυνση του σκυροδέματος συστατικών (παράγραφος 6.4.1). Η απαίτηση όσον αφορά την ανάπτυξη αντοχής δοκιμαστικού μίγματος είναι να μην καθυστερεί τη σκλήρυνση δοκιμαστικού μίγματος περισσότερο από 120 λεπτά και να μη μειώνει τη θλιπτική αντοχή 28 ημερών περισσότερο από 20%. Από ότι φαίνεται και στο Διάγραμμα 2, η αντοχή 28 ημερών αυξάνεται μέχρι και 21% με την αντικατάσταση συμβατικών αδρανών με σκωρίες χάλυβα, ενώ δεν παρατηρήθηκε αύξηση του χρόνου πήξης των μιγμάτων.

Πίνακας 5. Χημικές ιδιότητες των αδρανών

Έλεγχος	Περιεκτικότητα	Κατηγορία/απαίτηση κατά	
		EN12620	EN13242
Περιεκτικότητα σε Cl ⁻	0,039%	-	-
Θειικά διαλυτά σε οξέα	<0,8%	AS _{0,8}	AS _{0,8}
Ολικά θειικά	<1,0%	<1%	S ₁
MgO	4,7%	-	V ₅

* Τιμές από ΑΕΙΦΟΡΟ Α.Ε.



Διάγραμμα 2. Ανάπτυξη αντοχών σκυροδεμάτων με αδρανή σκωρίας

Για τις σκωρίες χάλυβα παρόλο που δεν ακολουθήθηκε η μεθοδολογία EN 1744-1 περί ελέγχου βλαπτικών συστατικών, υπάρχει de facto τεκμηρίωση από το ρυθμό ανάπτυξης αντοχής που αναπτύσσεται σε συνθέσεις σκυροδέματος με αδρανή σκωρίας χάλυβα (Διάγραμμα 2). Στο πρότυπο EN 13242 περί σταθερότητας όγκου των σκωριών σιδήρου και χάλυβα σε μη συνδετικά μίγματα, στην παράγραφο 6.4.2.1 αναφέρεται στον έλεγχο σταθερότητας όγκου των σκωριών χάλυβα, κυρίως λόγω του περιεχομένου MgO το οποίο προσδιορίζεται κατά EN 196-2. Στον πίνακα 14 του ιδίου προτύπου δίνονται ανάλογα με τη διάγνωση οι προβλεπόμενες κατηγορίες για αδρανή σκωρίας σε μη υδραυλικά συνδεδεμένα αναμίγματα. Παρόλο που στο άρθρο αυτό οι σκωρίες χάλυβα αντιμετωπίζονται ως αδρανή συνδετικών μιγμάτων, ο έλεγχος της περιεκτικότητας σε MgO έδειξε ότι δεν υπερβαίνει το 5%. Επίσης, όλες οι συνθέσεις σκυροδεμάτων με τα αδρανή αυτά για περίπου 5 χρόνια δεν παρουσίασαν κανένα πρόβλημα σταθερότητας όγκου.

Στις παραγράφους 6.4.2.2, 6.4.2.3 αναφέρονται ειδικοί έλεγχοι για αδρανή σκωρίας σιδήρου. Σχετικά με τα αδρανή σκωρίας, ελέγχθηκε σε σκυροδέματα η δυνατότητα οξείδωσης σιδήρου και εμφάνισης κηλίδων. Μετά από πολλούς κύκλους ύγρανσης-ξηράνσης δεν παρουσιάστηκε στο σκυρόδεμα δυσχρωμία ή κηλίδες σκουριάς.

Στα ανωτέρω αναφερόμενα πρότυπα EN είναι ενσωματωμένες οδηγίες για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις ώστε να είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα, οδηγίες που προτείνεται να ακολουθηθούν στο πλαίσιο πιστοποίησης του υλικού ως αδρανές σκυροδεμάτων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παρόλο που τα αδρανή σκωρίας χαλύβων δεν έχουν πιστοποιηθεί σύμφωνα με την διαδικασία που προβλέπεται βάσει του σχετικού κανονιστικού πλαισίου, μπορεί να λεχθεί με βεβαιότητα ότι εμπίπτουν στις διατάξεις των κανονισμών ως αδρανή σκυροδέματος και ως αδρανή υδραυλικών

αναμιγμάτων για οδοστρώσεις. Υπάρχει ήδη πάνω από 5 χρόνια εμπειρία από τη χρήση τους σε σκυροδέματα για διάφορες εφαρμογές (οδοστρώματα, δάπεδο, κυβόλιθοι, σκυροδέματα μεγάλου ειδικού βάρους) σε εργαστηριακή και εργοταξιακή κλίμακα.

Έχει αποδειχθεί ότι ως αδρανή υλικά:

- Συνεργάζονται άριστα με το τσιμέντο ή συστήματα συνδετικών κονιών όπως τσιμέντο + πουζολανικά υλικά και υπάρχει ομαλή αύξηση αντοχών με το χρόνο.
- Έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες κοκκομετρίες ή και σε συνεργασία με ποτάμια άμμο ή ασβεστολιθικά αδρανή χωρίς κανένα πρόβλημα.
- Δεν δημιουργεί ειδικές απαιτήσεις στην παρασκευή σκυροδέματος. Ακολουθούνται οι συμβατικοί τρόποι σχεδιασμού και παραγωγής σκυροδέματος.
- Το σκυρόδεμα εμφανίζει κατά τη θραύση ενισχυμένη τη διεπιφανειακή ζώνη αδρανών τσιμεντοπήγματος.
- Δεν παρουσιάζει με το χρόνο ογκομετρικές μεταβολές πέρα των προβλεπομένων για το σκυρόδεμα.
- Δεν παρουσιάζει κηλίδες στην επιφάνεια από οξείδωση σιδήρου.
- Οι δοκιμασίες εκπλυσιμότητας (leaching tests) που εφαρμόστηκαν έδειξαν μεγάλη συγκρατική ικανότητα μετάλλων στο σκυρόδεμα με σκωριοαδρανή κάτι που είναι ιδιαίτερα επιθυμητό και ενισχύει το οικολογικό προφίλ των σκωριοσκυροδεμάτων.
- Το σκυρόδεμα που προκύπτει με αδρανή σκωρίας χάλυβα είναι μεγάλου ειδικού βάρους $\geq 2,8 \text{ tn/m}^3$ εν σχέση με τα συμβατικά σκυροδέματα. Το ειδικό βάρος μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί ανάλογα με την κοκκομετρική σύνθεση ή το συνδυασμό κοιτασμάτων αδρανών διαφορετικής προσέλευσης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Beshr H., Almusallam A.A., Maslehuddin M. 'Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete', *Construction and Building Materials* **17** (2003) 97-103.
- [2] Shi C., Qian J. 'High performance cementing materials from industrial slags – a review', *Resources, Conservation and Recycling*, **29** 3 (2000), 195-207.
- [3] Matsunaga H. et al 'Environment-Friendly Block Made From Steel Slag', in V.M. Malhotra (ed.) *Proc. of the Eighth CANMET/ACI Int. Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*. Las Vegas, USA (2004) 457-470.
- [4] Annual Book of ASTM Standards Volume 04.02: Concrete and Aggregates (1996)
- [5] EN 12620: Aggregates for Concrete (2002)
- [6] EN 13242: Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction (2002)
- [7] EN 13043: Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads airfields and other trafficked areas (2002)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΑΔΡΑΝΩΝ ΚΑΤΑ EN12620 ΚΑΙ EN 13242

- EN 196-21:1989, Methods of testing cement — Part 21: Determination of the chloride, carbon dioxide and alkali content of cement.
- EN 932-3, Tests for general properties of aggregates — Part 3: Procedure and terminology for simplified petrographic description.
- EN 932-5, Tests for general properties of aggregates — Part 5: Common equipment and calibration.
- EN 933-1, Tests for geometrical properties of aggregates — Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method.
- EN 933-3, Tests for geometrical properties of aggregates — Part 3: Determination of particle shape — Flakiness index.
- EN 933-4, Tests for geometrical properties of aggregates — Part 4: Determination of particle shape — Shape index.
- EN 933-5, Tests for geometrical properties of aggregates — Part 5: Determination of percentage of crushed and broken surfaces in coarse aggregates particles
- EN 933-7, Tests for geometrical properties of aggregates — Part 7: Determination of shell content — Percentage of shells in coarse aggregates.
- EN 933-8, Tests for geometrical properties of aggregates — Part 8: Assessment of fines — Sand equivalent test.
- EN 933-9, Tests for geometrical properties of aggregates — Part 9: Assessment of fines — Methylene blue test.
- EN 933-10, Tests for geometrical properties of aggregates — Part 10: Assessment of fines — Grading of fillers (air jet sieving).
- EN 1097-1, Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval).
- EN 1097-2:1998, Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation.
- EN 1097-3, Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 3: Determination of loose bulk density and voids.
- EN 1097-6, Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 6: Determination of particle density and water absorption.
- EN 1097-8:1999, Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 8: Determination of the polished stone value.
- EN 1097-9, Tests for mechanical and physical properties of aggregates — Part 9: Determination of the resistance to wear by abrasion from studded tyres — Nordic test.
- EN 1367-1:1999, Tests for thermal and weathering properties of aggregates — Part 1: Determination of resistance to freezing and thawing.

- EN 1367-2, Tests for thermal and weathering properties of aggregates — Part 2: Magnesium sulfate test.
- EN 1367-3, Tests for thermal and weathering properties of aggregates — Part 3: Boiling test for “Sonnenbrand” basalt.
- EN 1367-4, Tests for thermal and weathering properties of aggregates — Part 4: Determination of drying shrinkage.
- EN 1744-1:1998, Tests for chemical properties of aggregates — Part 1: Chemical analysis.
- EN 1744-3, Tests for chemical properties of aggregates — Part 3: Preparation of eluates by leaching of aggregates.
- EN 196-2, Methods of testing cement — Part 2: Chemical analysis of cement.

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΚΗΣ ΤΕΦΡΑΣ, ΑΔΡΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ ΚΑΙ ΑΛΑΤΩΝ

Α. Βέργος

*Μεταλλειολόγος – Μεταλλουργός, Ε.Μ.Π., ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε., Τσίγγελη, 37100, Αλμυρός Μαγνησίας,
avergos@sovel.vionet.gr*

Α. Βέργου

Περιβαλλοντολόγος Μ.Σc., Πανεπιστήμιο Αιγαίου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η προστασία του ρευστού αλουμινίου από οξείδωση και η απομάκρυνση δύσστηκτων ενώσεων από το λουτρό κατά την τήξη δευτερογενούς αλουμινίου σε περιστρεφόμενους κλιβάνους έχει σχεδόν καθολικά επιβάλει τη χρήση μιγμάτων αλογονούχων αλάτων σαν συλλίπασμα. Μετά την απόχυση η σκουριά περιέχει εκτός των αλάτων, δάκρυα μετάλλου, οξείδια του αλουμινίου και μικρές ποσότητες εξώθερμων ενώσεων (AlN , Al_4C_3). Η προτεινόμενη εγκατάσταση επεξεργασίας της αλουμινικής τέφρας σχεδιάστηκε να καλύψει τις ανάγκες του χυτηρίου της ΕΛΒΑΛ και έχει πλεονάζουσα δυναμικότητα ώστε να γίνει αποδέκτης της τέφρας και μικρότερων χυτηρίων. Η παραγωγική διαδικασία έχει ως στόχους την ανάκτηση του μεταλλικού αλουμινίου, τον έλεγχο της έκλυσης επικίνδυνων αερίων και την καύση τους, την εκχύλιση των αλάτων, τη συγκέντρωση-πύκνωση και εξάτμιση των διαλυμάτων και τον διαχωρισμό και έκπλυση των οξειδίων.

Λέξεις κλειδιά: ανακύκλωση αλουμινίου, αδρανοποίηση τέφρας, εκχύλιση αλάτων, υδρόλυση, αλούμινα

ALUMINIUM ASH TREATMENT INSTALLATION, METAL AND SALTS NEUTRALIZATION AND RECYCLING

A. Vergos

Mining-metallurgical engineer, Technical University of Athens (NTUA), AEIFOROS S.A. Tsiggeli, 37100 Almyros, Magnesia, avergos@sovel.vionet.gr

A. Vergou

Environmentalist M.Sc., Aegean University

ABSTRACT: The protection of the molten aluminium from oxidization and the removal of the refractory compounds from the bath during the pouring of the secondary aluminium in rotating furnace has almost totally established the use of halogenous salts' mixtures as flux. After the pouring, the ash contains also, apart from the salts, metal dross, aluminium oxides and a small quantity of exothermic compounds (AlN , Al_4C_3). The suggested installation for the treatment of the aluminium ash has been developed to fulfil the needs of the foundry of ELVAL Hellenic Aluminium Industry and has surplus potential so as to become the receiver of the ash produced by other small foundries. The targets of the production procedure are the retrieval of the metal aluminium, the control of dangerous gases' emissions and their combustion, the extraction of salts, the concentration - condensation and evaporation of the solutions and the separation and leaching of oxides.

Keywords: aluminium recycling, ash neutralization, salts' extraction, hydrolysis, alumina

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αλουμίνιο, δεύτερο μετά το σίδηρο σημαντικότερο μέταλλο στη σύγχρονη οικονομία, κατέκτησε τη θέση του χάρη στις εξαιρετικές του ιδιότητες. Ακόμα και όπου μειονεκτεί με την προσθήκη μικρών ποσοστών άλλων μετάλλων δίνει κράματα που ανταποκρίνονται σχεδόν στο σύνολο των απαιτήσεων της τεχνολογίας. Η παραγωγή του στο διάστημα του εικοστού αιώνα από 8.000 τον. το 1900, έφτασε στους 25.000.000 τον. το 2000, χωρίς να υπολογίζονται 7.000.000 τον. μετάλλου που προέρχονται από ανακύκλωση κάθε χρόνο.

Μολονότι, σε αντίθεση με τα λοιπά βασικά μέταλλα δεν αντιμετωπίζει έλλειψη πρώτης ύλης (βωξίτη) για την πρωτογενή παραγωγή του, η ανακύκλωσή του άρχισε νωρίς εξ αιτίας της χαμηλής ειδικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτεί η παραγωγή δευτερόχytu (δευτερογενούς) αλουμινίου. Σε σύγκριση με τις 13.000 Kwh που περίπου απαιτούνται για την παραγωγή ενός τόνου πρωτόχytu (πρωτογενούς) αλουμινίου, η παραγωγή ίσης ποσότητας δευτερόχytu αλουμινίου απαιτεί λιγότερες από 600 Kwh. Η διαφορά αυτή εξηγεί το τεράστιο οικονομικό ενδιαφέρον για την ανακύκλωση του αλουμινίου και τις διαρκείς προσπάθειες που καταβάλλονται για τη βελτίωση της σχετικής τεχνολογίας.

ΤΗΞΗ ΤΟΥ ΣΚΡΑΠ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Το σκραπ προκειμένου να χρησιμοποιηθεί εκ νέου, πρέπει να εξευγενιστεί και να μορφοποιηθεί. Η φάση αυτή επιτυγχάνεται με την τήξη του σε ανακλινόμενες περιστροφικές καμίνους. Η κατεργασία αυτή γίνεται με την ακόλουθη σειρά:

(α) Η κάμιнос θερμαίνεται με πετρέλαιο ή φυσικό αέριο και φορτίζεται με συλλίπασμα μίγματος χλωριούχου νατρίου και χλωριούχου καλίου σε αναλογία 50/50 έως 70/30 αντίστοιχα. Ενίστε προστίθεται μικρό ποσοστό φθορίτη (CaF_2). Η ποσότητα του συλλιπάσματος ανά τόνο επεξεργαζόμενου σκραπ, κυμαίνεται περί τα 400 Kg ανάλογα με την ποιότητα του σκραπ.

(β) Μετά την καθολική τήξη του συλλιπάσματος, προστίθεται σταδιακά το σκραπ αλουμινίου, ώστε το μέταλλο να βρίσκεται πάντοτε σκεπασμένο στο ρευστό συλλίπασμα.

(γ) Κάτω από τη συνεχή περιστροφή της καμίνου που θερμαίνεται διαρκώς, το στερεό μέταλλο τήκεται, ενώ οι ξένες ύλες που το συνοδεύουν συγκρατούνται στο λιωμένο συλλίπασμα και δεν μολύνουν το λουτρό του μετάλλου.

(δ) Μόλις ολοκληρωθεί η τήξη, το καθαρό μέταλλο χυτεύεται σε χελώνες και το ρευστό αλάτι με τις ξένες ύλες αποχύνεται σε καλούπια όπου ασκείται πίεση με κατάλληλο έμβολο και το τυχόν αλουμίνιο που συγκρατείται ρέει με τη μορφή δακρύων και συλλέγεται. Μετά το στράγγισμα του αλουμινίου, το υλικό που απομένει ονομάζεται αλουμινική τέφρα και αποτελεί το αντικείμενο επεξεργασίας που θα ακολουθήσει.

Η χρήση των αλάτων έχει ευεργετικά αποτελέσματα σε όλη τη διαδικασία, γιατί προστατεύει το λιωμένο μέταλλο από την οξείδωση, επιταχύνει την τήξη μεταφέροντας τη θερμότητα από τα άλατα στο σκραπ και τέλος συγκρατεί τις ξένες ύλες εξευγενίζοντας το μέταλλο. Παρόλα αυτά, πολλά μικρά χυτήρια αποφεύγουν τη χρήση του και γι αυτό οι τέφρες δεν περιέχουν άλατα.

Η ΑΛΟΥΜΙΝΙΚΗ ΤΕΦΡΑ

Η χημική σύνθεση της αλουμινικής τέφρας είναι η ακόλουθη:

~ 50% οξείδια Al_2O_3

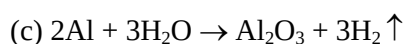
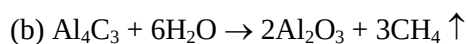
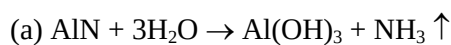
~ 40% άλατα ($\text{NaCl} + \text{KCl}$)

~ 4% αλουμίνιο

~ 4% «εξώθερμα» (AlN , Al_4C_3 ,)

~ 2% άλατα διάφορα (MgCl_2 , CaCl_2 , MnO , κλπ)

Η τέφρα δεν μπορεί να αποτεθεί ελεύθερα, διότι παρουσία υγρασίας, ακόμα και της ατμοσφαιρικής, τα «εξώθερμα» υδρολύονται σύμφωνα με τις ακόλουθες αντιδράσεις:



Στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι, για κάθε τόνο τέφρας, αντιστοιχούν 10 m^3 μίγματος των παραπάνω αερίων.

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό κατάλογο αποβλήτων (EKA) η αλουμινική τέφρα εντάσσεται στους κωδικούς :

10 03 04 Σκωρίες πρωτογενούς τήξης / λευκά απορρίμματα

10 03 08 Αλατούχες σκωρίες από δευτερογενή τήξη

10 03 09 Μαύρα απορρίμματα από δευτερογενή τήξη

10 03 10 Απορρίμματα από επεξεργασία αλατούχων σκωριών και μαύρων απορριμμάτων

Θεωρείται επικίνδυνη για το περιβάλλον διότι τα αέρια προϊόντα της υδρόλυσης είναι τοξικά (NH_3) και αναφλέξιμα (H_2O και CH_4).

Τα σημερινά αποδεκτά μέγιστα όρια είναι:

$$\text{AlN} \leq 0,18\%$$

$$\text{Al} \text{ σκόνη} \leq 0,08\% \text{ και}$$

$$\text{Al}_4\text{C}_3 \leq 0,22\%$$

Εναλλακτικά, ένα Kg αλουμινικής τέφρας με την προσθήκη περίσσειας H_2O σε μια ώρα, μπορεί να εκλύει το πολύ 1 m^3 μίγματος των παραπάνω αερίων.

Επειδή τα περιεχόμενα «εξώθερμα» συμμετέχουν με ποσοστό ~ 4% στην αλουμινική τέφρα, είναι επιβεβλημένη η επεξεργασία της σε κατάλληλες για το σκοπό αυτό εγκαταστάσεις.

Εγκατάσταση επεξεργασίας αλουμινικής τέφρας

Από όσα έχουν περιγραφεί, είναι πρόδηλο ότι η επεξεργασία της αλουμινικής τέφρας έχει τους εξής στόχους:

- α) ανάκτηση του μεταλλικού αλουμινίου που παρασύρθηκε κατά την απομετάλλωση του κλίβανου,
- β) εκχύλιση των αλάτων του συλλιπάσματος και ανάκτησή τους για ανακύκλωση στον κλίβανο,
- γ) έκπλυση των αδιάλυτων οξειδίων του αλουμινίου ώστε να προωθηθούν στην αγορά τσιμέντου
- δ) εξουδετέρωση με καύση και καθαρισμό των εκλυόμενων αερίων ώστε να διατεθούν στην ατμόσφαιρα

Έχουν αναπτυχθεί και βελτιώνονται συνεχώς, πλήθος μεθόδων επεξεργασίας, ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες που αντιμετωπίζει κάθε μια βιομηχανία. Όλες οι μέθοδοι ακολουθούν τα εξής στάδια.

- 1) Ξηρή επεξεργασία
- 2) Υγρή επεξεργασία
- 3) Αφυδάτωση – Ξήρανση
- 4) Καύση και καθαρισμός των αερίων

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή κάθε σταδίου.

1) ΞΗΡΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (Σχ. 1)

Στο στάδιο αυτό μειώνεται σταδιακά το μέγεθος του υλικού ικανοποιώντας ταυτόχρονα δύο στόχους:

- α) Αποδέσμευση του μεταλλικού αλουμινίου ώστε να διαχωριστεί από την τέφρα με κατάλληλη διάταξη
- β) Προετοιμασία της τέφρας ώστε το επόμενο στάδιο της εκχύλισης να είναι αποδοτικό. Η επιλογή του κυκλώματος έγινε ώστε να αποφεύγεται η υπερλειοτρίβηση που οδηγεί σε απώλειες αλουμινίου, αύξηση της έκλυσης υδρογόνου και επιβάρυνση του κυκλώματος αποκονίωσης.

Σύντομη περιγραφή της εγκατάστασης

Η τέφρα παραλαμβάνεται από το χυτήριο σε μέγεθος 0 – 300 mm και τροφοδοτείται στην εγκατάσταση θραύσης, όπου με τρεις διαδοχικούς σπαστήρες το μέγεθος μειώνεται σταδιακά σε – 2 mm. Ενδιάμεσα, το υλικό ταξινομείται σε περιστροφικό κόσκινο και τα μεσαία μεγέθη 2-10 και 10-50 mm τροφοδοτούνται εναλλάξ σε διαχωριστή δινορευμάτων, αφαιρείται επιλεκτικά το αποδεσμευμένο αλουμίνιο, αποφεύγοντας την υπερλειοτρίβηση. Το προϊόν του διαχωριστή προωθείται στο χυτήριο για ανακύκλωση, ενώ το υπόλοιπο υλικό σε μορφή άμμου οδηγείται στο επόμενο στάδιο της υγρής επεξεργασίας για την διαδικασία της εκχύλισης.

Όπως σε κάθε εγκατάσταση μείωσης του μεγέθους, σε κάθε σπαστήρα και κόσκινο δημιουργείται σκόνη που με χοάνες και αεραγωγούς συγκεντρώνεται σε σακκόφιλτρα, όπου συγκρατείται και τροφοδοτείται με το τριμμένο υλικό. –2 mm στην εγκατάσταση της εκχύλισης.

2) ΥΓΡΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ (Σχ. 2)

Στο στάδιο αυτό εκχειλίζονται τα διαλυτά άλατα με νερό, υδρολύονται τα περιεχόμενα «εξώθερμα» παραγομένων επικίνδυνων αερίων και τέλος εκπλένονται τα αδιάλυτα οξείδια.

Σύντομη περιγραφή της εγκατάστασης

Η τέφρα τροφοδοτείται με ελεγχόμενο ρυθμό συνεχώς σε αντιδραστήρα εκχύλισης (περιστρεφόμενο τύμπανο), όπου τα άλατα διαλύονται στο νερό που προέρχεται από το στάδιο της έκπλυσης. Είναι δηλαδή ακόρεστο σε άλατα. Η τροφοδοσία και η εκροή ελέγχονται αυτόματα, ώστε το εξερχόμενο του τυμπάνου διάλυμα να είναι κορεσμένο σε άλατα και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται από την υδρόλυση των «εξώθερμων» να διατηρείται στο επιθυμητό επίπεδο. Ο πολφός άλμης των αλάτων – αδιάλυτων οξειδίων τροφοδοτείται σε υδροκυκλώνα, όπου διαχωρίζονται αδρά η άλμη από τα στερεά και καθένα οδηγείται στη γραμμή παραπέρα επεξεργασίας του.

- Η άλμη των αλάτων απαλλάσσεται των λεπτομερών στερεών που παρασύρονται σε αυτή, ηρεμώντας μέσα σε παχυντή, με τη βοήθεια κροκιδωτικού. Η διαυγής υπερχειλίση του παχυντή, τροφοδοτείται σε αντιδραστήρα, όπου με την προσθήκη κατάλληλου αντιδραστηρίου, καθιζάνουν άλατα Ca και Mg, που αν δεν αφαιρεθούν με τις διαδοχικές χρήσεις του συλλιπάσματος, θα εξουδετέρωναν τις δραστικές του ιδιότητες. Μετά την καταβύθιση των αλκαλικών γαιών (Mg και Ca) το διάλυμα της άλμης, είτε τροφοδοτείται σε αλυκή όπου εξατμίζεται το νερό με την ηλιακή ενέργεια, είτε σε ξηραντήριο, όπου τελικά παράγεται στερεό αλάτι με τη σύνθεση του μίγματος τροφοδοσίας εκτός του φθορίτη. Αν προστεθεί στην επιθυμητή αναλογία και ο τελευταίος, το αλάτι είναι έτοιμο να επαναχρησιμοποιηθεί.

- Τα στερεά οξείδια του αλουμινίου εκπλένονται με νερό σε διαδοχικούς σπειροειδείς υδροταξινομητές, μέχρις ότου απαλλαγεί από τα χλωριόντα σε ποσοστό <0,2% και τέλος αποτίθεται σε πλατεία μέχρις ότου η περιεχόμενη υγρασία μειωθεί από 35% σε λιγότερη από 3%, ώστε να είναι κατάλληλη για παραγωγή τσιμέντου.

3) ΑΦΥΔΑΤΩΣΗ - ΞΗΡΑΝΣΗ

Τα στάδια αυτά της επεξεργασίας περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, γιατί αποτελούν αδιάσπαστη συνέχεια της υγρής επεξεργασίας. Γίνεται εδώ αναφορά, διότι επελέγησαν οι πλέον φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις.

4) ΚΑΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΑΕΡΙΩΝ (Σχ. 3)

Στην κορυφή κάθε αντιδραστήρα υπάρχει διάταξη συγκέντρωσης των εκλυόμενων αερίων και με αεραγωγούς κατευθύνονται στον αντιδραστήρα εξουδετέρωσης της αμμωνίας με H_2SO_4 . Το παραγόμενο $(NH_4)_2SO_4$ ξηραίνεται και προωθείται στη γεωργία σαν λίπασμα. Τα αέρια στην συνέχεια καίγονται σε καυστήρα πετρελαίου και η παραγόμενη θερμότητα αξιοποιείται στην ξήρανση της άλμης. Τα τελικά απαέρια του καυστήρα διέρχονται από φίλτρο ενεργού άνθρακα, όπου δεσμεύονται τυχόν ίχνη φωσφίνης και υδρόθειου (PH_3 και H_2S) αποδιδόμενα στο περιβάλλον χωρίς πρόβλημα.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Με το κύκλωμα επεξεργασίας που περιγράφηκε αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργεί η υδρόλυση των «εξώθερμων» και παράγονται χρήσιμα προϊόντα. Από τα προϊόντα, το μεταλλικό αλουμίνιο και τα άλατα ανακυκλώνονται στα χυτήρια δευτερόχytu (secondary) αλουμινίου ενώ τα αδιάλυτα οξείδια και άλατα του αλουμινίου

μπορούν να διατεθούν είτε στη βιομηχανία τσιμέντου, ιδιαίτερα του λευκού, επειδή στερούνται σιδήρου είτε στην παραγωγή πρωτογενούς αλουμινίου υποκαθιστώντας βωξίτη.

Τέλος, η εγκατάσταση αυτή θα είναι διαθέσιμη για την επεξεργασία της τέφρας πλήθους μικρών χυτηρίων που σήμερα απορρίπτεται ανεξέλεγκτα προκαλώντας ρύπανση του περιβάλλοντος.

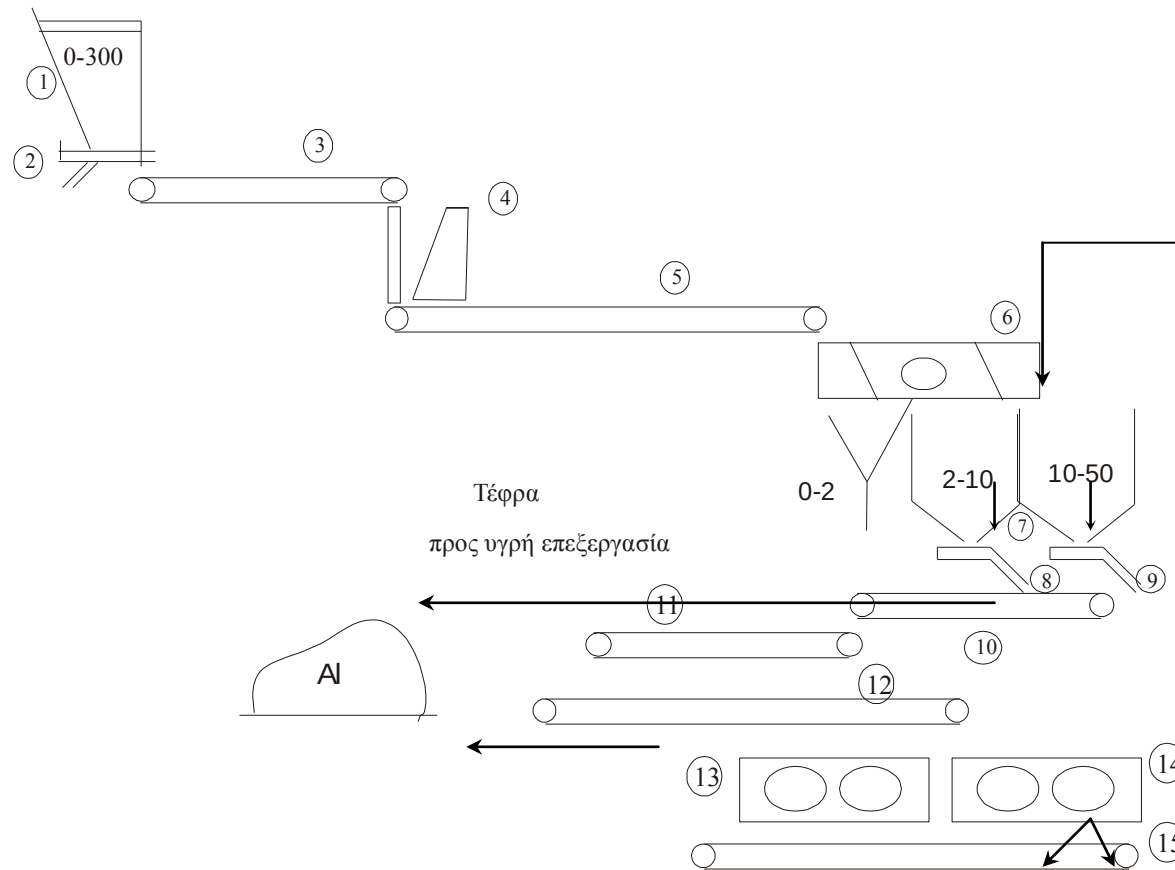
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται από τη θέση αυτή ευχαριστίες στους συναδέλφους μηχανικούς Κ.Μωραΐτη και Κ.Βαμβακόγλου για τη συμβολή τους στην συγκέντρωση στοιχείων και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, ιδιαίτερα δε στον Α.Στρατή Γ.Διευθυντή της ΑΕΙΦΟΡΟΥ Α.Ε. για τη σύλληψη και διαρκή ενθάρρυνση στην προσπάθεια επίλυσης αυτού του χρονίζοντος και επιβαρυντικού προβλήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Brown, R.J. Keller, R.J. & Lang, C. F. 1982. Process for the production of Alumina and Alumina compounds from wastes. U.S. Patent No 4,348,366.
2. Cromwell, P.J. 1978. Method for processing dross. U.S. Patent 4,126,673.
3. Olper, M. Corsini, T. & Fracchia, P. 1991. Process for the processing of slag from Aluminum scrap etc. U.S. Patent 5,013,356.
4. Peterson, R.P. 1988. Spent salt flux recycling. U.S. Patent 4,752,328.
5. Skurko, R. 2000. Dross processing. U.S. Patent 6,082,641.
6. Μωραΐτης, Κ. 2005. Προκαταρκτική μελέτη διεργασίας ανάκτησης αλουμινίου, αλάτων και εξώθερμων από σκωρία χυτηρίου αλουμινίου. Τεύχος Ι. Βόλος: Αρχείο ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.

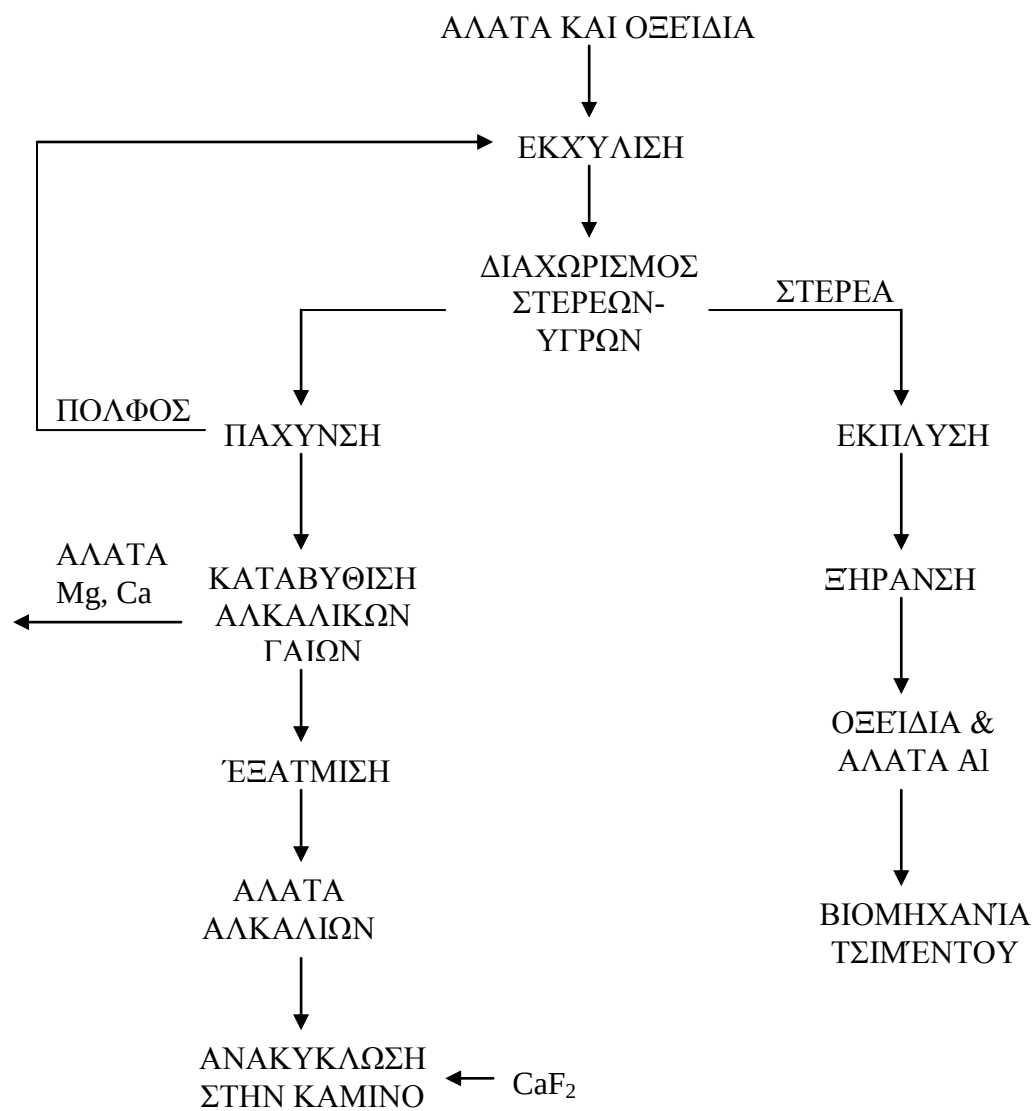
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



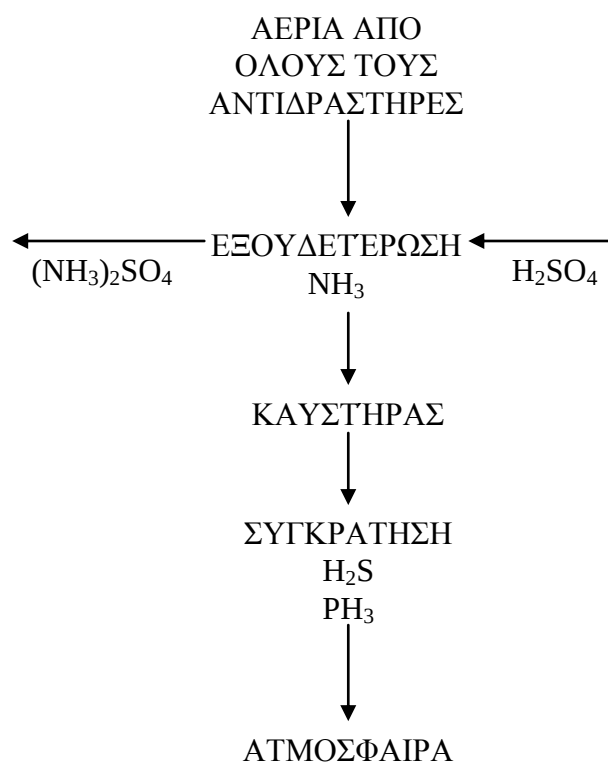
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- 1 Σιλό 50tn
- 2 Μ.Τ.
- 3 ΜΤ
- 4 Σιαγωνωτός σπαστήρας
- 5 ΜΤ
- 6 Περιστροφικό κόσκινο
- 7 Δίδυμο σιλό
- 8 Τροφοδότης
- 9 Τροφοδότης
- 10 Μ.Τ.
- 11 Δ.Δ. (E.C.S.)
- 12 Μ.Τ.
- 13 Κυλινδρικός σπαστήρας
- 14 Κυλινδρικός σπαστήρας
- 15 Μ.Τ.

Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας Al-ash, Α' Ξηρή διαδικασία



Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής υγρής κατεργασίας



Σχήμα 3: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας αερίων

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΟΙΚΟΔΟΜΙΚΩΝ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ – Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Χ.-Τ. Γκαλμπένης και Σ. Τσίμας

*Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη
Ζωγράφου, Τ.Κ. 15773*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Τα Οικοδομικά Απορρίμματα (Ο.Α.) αποτελούν μεγάλο μέρος του συνόλου των στερεών απορριμμάτων. Η αξιοποίηση τους έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον των περισσότερων χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των πολλαπλών περιβαλλοντικών οφελών που προκύπτουν από την χρήση τους. Είναι ενδεικτικό ότι στις χώρες της Ε.Ε. παράγονται περίπου 450 εκατομμύρια τόνοι Ο.Α. ετησίως, ενώ το ποσοστό της ανακύκλωσης τους φθάνει το 30%. Στην Ελλάδα εκτιμάται ότι η αντίστοιχη ετήσια ποσότητα ανέρχεται σε 5,5 εκατομμύρια τόνους, ενώ το ποσοστό αυτών που ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται δεν ξεπερνά το 5%. Από την παραπάνω αντιστοιχία γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η χώρα μας έχει καθυστερήσει χαρακτηριστικά στην οργάνωση ενός δικτύου συλλογής και αξιοποίησης των Ο.Α. Μία από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στην Ελλάδα αναφορικά με την διαχείριση των Ο.Α. αποτελεί η εφαρμογή του νόμου 2939/2001 που θέτει το θεσμικό πλαίσιο συλλογής και αξιοποίησης τους. Με βάση τα ανωτέρω, η παρούσα εργασία επιχειρεί την ανάλυση πρόσφατων δεδομένων σχετικά με την διαχείριση των Ο.Α., ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην παρουσίαση της εγχώριας κατάστασης.

Λέξεις κλειδιά: οικοδομικά απορρίμματα, διαχείριση οικοδομικών απορριμμάτων

CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE MANAGEMENT – THE EXISTING SITUATION IN GREECE

C.-T. Galbenis and S.Tsimas

School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens, Heroon Polytechniou 9, Zografou Campus, GR-15773

ABSTRACT: Construction and Demolition (C&D) wastes represent a great part of the total solid wastes. Their exploitation is presented very attractive, in most European Union (EU) countries, due to the environmental benefits that are resulted from their reutilization. In EU countries, 450 million tones of C&D wastes are produced annually while their recycling percentage is 30%. In Greece, it is estimated that the relevant annual production is 5.5 million tones while the percentage of C&D wastes that are recycled and reused does not convince 5%. From the above correspondence, it is resulted that Greece has been delayed in the organization of a network for the collection and utilization of C&D wastes. One of the most important progresses in Greece relative to the management of C&D wastes is the application of the law 2939/2001 which sets the legislation framework of their collection and exploitation. Based on the above, this paper analyses recent data with regards to the management of C&D wastes, while special emphasis is given on the presentation of the current situation in Greece.

Keywords: construction and demolition waste, construction and demolition waste management

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος Οικοδομικά Απορρίμματα (Ο.Α.) αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα υλικών, τα οποία υπάγονται στο κεφάλαιο 17 του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων, σύμφωνα με την Απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 2001/118/ΕΚ της 16^{ης} Ιανουαρίου 2001. Η πιο πρόσφατη μορφή του καταλόγου όσον αφορά στα Ο.Α. είναι αυτή που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1 [1,2].

Πίνακας 1. Κατηγορίες Ο.Α. σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κατάλογο αποβλήτων (συνοπτική μορφή ταξινόμησης Ο.Α.)

Κωδικός αριθμός	Κατηγορία
17 01	Σκυρόδεμα, τούβλα, πλακάκια και κεραμικά
17 02	Ξύλο, γυαλί και πλαστικό
17 03	Μείγματα ασφάλτου και ορυκτής πίσσας, λιθανθρακόπισσα και προϊόντα πίσσας
17 04	Μέταλλα (περιλαμβανομένων και των κραμάτων τους)
17 05	Χώματα (περιλαμβανομένων χωμάτων εκσκαφής από μολυσμένες τοποθεσίες), πέτρες και μπάζα εκσκαφών
17 06	Μονωτικά υλικά και υλικά δομικών κατασκευών που περιέχουν αμιάντο
17 08	Υλικά δομικών κατασκευών με βάση το γύψο
17 09	Άλλα απόβλητα δομικών κατασκευών και κατεδαφίσεων

Οι πιο συνηθισμένες πηγές παραγωγής των Ο.Α. μπορούν να θεωρηθούν οι ακόλουθες [3,4]:

- οικοδομικές εργασίες κάθε είδους, όπως ανεγέρσεις, κατεδαφίσεις, ανακαινίσεις, επισκευές, περιφράξεις κατοικιών, επαγγελματικών χώρων και γενικότερα κτιριακών συγκροτημάτων.
- έργα τεχνικών υποδομών, όπως κατεδαφίσεις, κατασκευές ή και επιδιορθώσεις δρόμων, γεφυρών, σηράγγων, αποχετευτικών δικτύων, πεζοδρομίων καθώς και αναπλάσεις χώρων κ.α.
- φυσικές ή τεχνολογικές καταστροφές, όπως σεισμοί, πλημμύρες, κατολισθήσεις, και γενικότερα δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες.

Τα απορρίμματα που παράγονται από τις ανωτέρω δραστηριότητες είναι σχεδόν στο σύνολό τους αδρανή υλικά [5], δηλαδή υλικά τα οποία δεν υφίστανται καμία σημαντική χημική, φυσική ή βιολογική μετατροπή. Επιπρόσθετα, δεν διαλύονται, δεν καίγονται ούτε συμμετέχουν σε άλλες φυσικές ή χημικές αντιδράσεις, δεν βιοδιασπώνται, ούτε επιδρούν δυσμενώς σε άλλα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή κατά τρόπο ικανό να προκαλέσει ρύπανση του περιβάλλοντος ή να βλάψει την υγεία του ανθρώπου.

Τα Ο.Α. δύνανται να περιέχουν μικρές ποσότητες επικίνδυνων ή τοξικών υλικών [4,5]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο αμιάντος, ο μόλυβδος και άλλα βαρέα μέταλλα, οι υδρογονάνθρακες, οι κόλλες, τα χρώματα, τα συντηρητικά για επεξεργασία ξύλου κ.α.. Παρόλο που οι ποσότητες επικίνδυνων υλικών είναι μικρές σε σχέση με τη συνολική ποσότητα αυτού του είδους απορριμμάτων, θα πρέπει να λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα για τη διαχείρισή τους.

Η ανάγκη ανακύκλωσης των Ο.Α. υπαγορεύεται από το γεγονός ότι α) επιτρέπει την ορθολογική χρήση μεγάλων ποσοτήτων φυσικών πόρων, που διαφορετικά θα εξορύσσονταν, β) συμβάλλει στη μείωση της ποσότητας των απορριμμάτων που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ και παρατείνει το χρόνο ζωής τους και γ) μειώνει τις επιπτώσεις στο περιβάλλον από την ταφή τους (στραγγίσματα από την αποσύνθεση των μη αδρανών υλικών).

Τα προϊόντα ανακύκλωσης των Ο.Α. χρησιμοποιούνται ήδη με επιτυχία, σε πολλές χώρες, και με αρκετές εφαρμογές. Οι κυριότερες από αυτές είναι η χρήση τους ως δευτερογενούς υλικού στην οδοποιία, υλικού επιχώσεων σε τεχνικά έργα, υλικού αποκατάστασης ανεξέλεγκτων χωματερών και ΧΥΤΑ, υλικού αποστραγγιστικών ζωνών σε τεχνικά έργα και ως αδρανή για την παρασκευή σκυροδέματος [6].

Με βάση τα ανωτέρω, η παρούσα εργασία αναλύει τις σύγχρονες τάσεις που επικρατούν στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) αναφορικά με την διαχείριση των Ο.Α. ενώ ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στην παρουσίαση της έγχωριας κατάστασης.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ Ο.Α. ΣΤΙΣ ΧΩΡΕΣ ΤΗΣ Ε.Ε.

Παρούσα κατάσταση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα Ο.Α. αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα ρεύματα αποβλήτων στην Ε.Ε. καθώς η ποσότητα τους εκτιμάται ότι ανέρχεται σε περίπου 450 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Στην παρούσα φάση το ποσοστό της ανακύκλωσης των υλικών αυτών είναι περίπου 30%, τη στιγμή που επιστημονικές εκτιμήσεις υποστηρίζουν ότι το ποσοστό αυτό είναι δυνατόν να πλησιάσει το 90% [3,7].

Μεταξύ των χωρών της Ε.Ε., η Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο εμφανίζονται ως οι μεγαλύτεροι παραγωγοί Ο.Α. [2]. Αυτό οφείλεται στον υψηλό δείκτη οικονομικής ανάπτυξης και στην υψηλή πληθυσμιακή συγκέντρωση των χωρών αυτών, γεγονός που ευνοεί την οικοδομική δραστηριότητα και κατά συνέπεια την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων Ο.Α.. Αντίστοιχα χώρες όπως η Ελλάδα και η Πορτογαλία εμφανίζουν είτε ελλιπή στοιχεία είτε υποεκτιμάται ο όγκος των παραγόμενων απορριμμάτων, κυρίως λόγω αυθαίρετης εναπόθεσης των Ο.Α. σε περιοχές όπου είναι αδύνατη η καταγραφή.

Στο πλαίσιο αυτό η Ε.Ε. έχει κατατάξει τα μέλη της σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το ποσοστό ανακύκλωσης που επιτυγχάνουν [1,7]. Στην πρώτη κατηγορία βρίσκονται η Ισπανία, η Ελλάδα, η Νότια Ιταλία και η Πορτογαλία. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτής της κατηγορίας είναι τα ακόλουθα:

- Το κόστος εναπόθεσης στους ΧΥΤΑ είναι χαμηλό και τα πρόστιμα για παράνομες εναποθέσεις είναι σχεδόν ανύπαρκτα.
- Τα πρωτογενή υλικά παραμένουν φθηνά
- Δεν υπάρχει επαρκής εξοπλισμός ανακύκλωσης των Ο.Α.

Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γαλλία, το Λουξεμβούργο, το Βέλγιο και η Β. Ιταλία. Κοινό χαρακτηριστικό των ανωτέρω χωρών αποτελεί το υψηλό κόστος εναπόθεσης

των Ο.Α. στους ΧΥΤΑ καθώς και η μεγαλύτερη αγορά ανακυκλώσιμων υλικών, γεγονός που ευνοεί τις δραστηριότητες ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των Ο.Α.

Τέλος, στην τρίτη κατηγορία περιλαμβάνονται χώρες όπου η διαχείριση των Ο.Α. αντιμετωπίζεται με αυξημένη περιβαλλοντική ευαισθησία ενώ το κατά κεφαλήν εισόδημα είναι ιδιαίτερα υψηλό. Τέτοιες χώρες είναι η Γερμανία, η Δανία, η Ολλανδία, η Σουηδία και η Αυστρία. Στις χώρες αυτές το υψηλό κόστος εναπόθεσης, η αυστηρή νομοθεσία, οι ευνοϊκές φορολογικές ρυθμίσεις, τα οικονομικά κίνητρα χρήσης ανακυκλωμένων υλικών και η μεγάλη αγορά ανακυκλώσιμων υλικών συντελούν στην αποτελεσματική ανακύκλωση των Ο.Α.

Μέθοδοι διαχείρισης Ο.Α.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν οι χώρες της Ε.Ε. για τη διαχείριση των Ο.Α. είναι η εδαφική διάθεση, η ανακύκλωση-επαναχρησιμοποίηση και η καύση του ελαφρού κλάσματος αυτών [2,3,7]. Η εδαφική εναπόθεση αποτελεί την κυριότερη μέθοδο διαχείρισης των Ο.Α. καθώς περίπου το 70% αυτών οδηγούνται σε χώρους ταφής ή απορρίπτονται ανεξέλεγκτα, χωρίς να τηρούνται πάντοτε οι απαραίτητες προδιαγραφές (διαχωρισμός επικίνδυνων αποβλήτων).

Η εφαρμογή της οδηγίας 1999/31/ΕΕC για την υγειονομική ταφή των απορριμμάτων έχει ως στόχο την πρόληψη ή και την μείωση των αρνητικών συνεπειών της ταφής των απορριμμάτων τόσο για το περιβάλλον όσο και για την ανθρώπινη υγεία. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και την σύνθεση τους, τα Ο.Α. θα πρέπει να απορρίπτονται σε μία από τις τρεις κατηγορίες ΧΥΤΑ που προβλέπονται από την οδηγία. Η τροποποίηση της οδηγίας επιτρέπει την απόρριψη συγκεκριμένων Ο.Α. σε ΧΥΤΑ για αδρανή υλικά. Ειδικότερα, επιτρέπεται η απόρριψη σκυροδέματος, τούβλων, κεραμικών, που είναι γνωστή η προέλευσή τους και στα οποία περιέχονται χαμηλές ποσότητες άλλων υλικών (μέταλλα, πλαστικά, ξύλο, ελαστικά, οργανικά κ.α.). Δεν επιτρέπεται η απόρριψη σε ΧΥΤΑ Ο.Α. που έχουν ρυπανθεί από επικίνδυνες οργανικές ή ανόργανες ουσίες. Επίσης, δεν επιτρέπεται η απόρριψη σε ΧΥΤΑ Ο.Α. στα οποία έχει γίνει επεξεργασία, κάλυψη ή βαφή με υλικά που περιέχουν επικίνδυνες ουσίες.

Ορισμένες χώρες προβλέπουν στην νομοθεσία τους τον περιορισμό ή και την απαγόρευση των Ο.Α. στους χώρους υγειονομικής ταφής. Στην Ολλανδία από την 1^η Ιανουαρίου του 1997 απαγορεύεται η ταφή ανακυκλώσιμων Ο.Α. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα το 2000 το ποσοστό ανάκτησης να φθάσει το 90%. Στην Δανία, πάνω από τους μισούς δήμους της χώρας (οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την συλλογή των Ο.Α.) έχουν ειδικούς κανονισμούς για την διαλογή αυτών των απορριμμάτων. Το ποσοστό ανάκτησης σε αυτή τη περίπτωση ξεπέρασε το 82%. Στη Φλαμανδία του Βελγίου, από τον Ιούλιο του 1998, απαγορεύθηκε η υγειονομική ταφή των απορριμμάτων, στα οποία δεν έχει γίνει διαλογή. Αυτό σημαίνει ότι για να οδηγηθούν τα Ο.Α. σε ΧΥΤΑ θα πρέπει να έχει γίνει διαλογή ή επιλεκτική κατεδάφιση. Τέλος, στη Γερμανία απαγορεύεται η ταφή των αναμειγμένων Ο.Α., πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρξει ειδική επεξεργασία πριν την ταφή.

Πέραν της εδαφικής εναπόθεσης, για την εφαρμογή της ανακύκλωσης-επαναχρησιμοποίησης των Ο.Α. είναι πολύ σημαντικό να απομακρυνθούν τα επικίνδυνα απόβλητα πριν την κατεδάφιση ενός κτιρίου ή την καταστροφή κάποιας κατασκευής. Αυτό εξασφαλίζει ότι δεν θα ρυπανθούν όλα τα υπόλοιπα απορρίμματα που θα ανακυκλωθούν και ότι θα γίνει κατάλληλη επεξεργασία των επικίνδυνων ουσιών. Η σημασία της διαλογής είναι μεγάλη ακόμα και στην περίπτωση των μη

επικίνδυνων απορριμμάτων προκειμένου να παραχθούν ανακυκλωμένα προϊόντα καλής ποιότητας με εμπορική αξία. Η επιλογή κατάλληλων τεχνικών διαλογής (π.χ. επιλεκτική κατεδάφιση) είχε ως αποτέλεσμα σε πολλές χώρες της Ε.Ε. να υπάρξει σημαντική αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης των Ο.Α.

ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΑΝΦΟΡΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ Ο.Α.

Πληροφοριακά στοιχεία

Η Ελλάδα χαρακτηρίζεται από την έλλειψη ενός οργανωμένου δικτύου συλλογής και αξιοποίησης των Ο.Α. [1,4]. Το γεγονός αυτό έχει διευρύνει το χάσμα που υπάρχει με πολλές χώρες της Ε.Ε., οι οποίες εδώ και χρόνια προωθούν με συστηματικό και οργανωμένο τρόπο (νομοθεσίες, υποδομές, ευαισθητοποίηση και ενημέρωση των εμπλεκόμενων φορέων) την εναλλακτική διαχείριση των εν λόγω απορριμμάτων. Στην χώρα μας εκτιμάται ότι η παραγόμενη ποσότητα των υλικών που προέρχονται από κατασκευές και κατεδαφίσεις κτιρίων είναι της τάξεως των 5,5 εκατομμυρίων τόνων ετησίως, από τα οποία ποσοστό μικρότερο του 5% ανακυκλώνεται και επαναχρησιμοποιείται. Οι ετήσιες ποσότητες των υλικών που προέρχονται από εργασίες εκσκαφών ανέρχονται σε 42 εκατομμύρια τόνους. Σε κάθε περίπτωση οι ποσότητες βασίζονται σε εκτιμήσεις καθώς υπάρχει έλλειψη επίσημων στατιστικών στοιχείων για τα υλικά αυτά [8].

Η διαχείριση των Ο.Α. στη χώρα μας εφαρμόζεται στη φάση της απλής εδαφικής εναπόθεσης. Βασικές αιτίες αυτής της πραγματικότητας είναι αφενός η μεγάλη ανάγκη για εδαφικό υλικό κάλυψης στους Χ.Υ.Τ.Α. και στις νόμιμες χωματερές με αποτέλεσμα τη δωρεάν εναπόθεση των Ο.Α., αφετέρου στην ύπαρξη μεγάλου αριθμού παράνομων χωματερών στις οποίες εναποτίθενται μεταξύ των άλλων και σημαντικές ποσότητες Ο.Α.. Επιπλέον, σε σύγκριση με το μέσο όρο της Ε.Ε., οι πρώτες ύλες παραμένουν ακόμα φθηνές, με αποτέλεσμα να εκλείπει και το οικονομικό κίνητρο της ανακύκλωσης των υλικών αυτών [3,7].

Νομοθετικό πλαίσιο

Μία από τις πιο σημαντικές εξελίξεις στην χώρα μας αναφορικά με την διαχείριση των Ο.Α. αποτελεί η εφαρμογή του νόμου 2939/01 που θέτει το θεσμικό πλαίσιο συλλογής και αξιοποίησης των υλικών αυτών [9]. Το υπό έκδοση Προεδρικό Διάταγμα (Π.Δ.), που φέρει τον τίτλο «Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση τους», αποσκοπεί στη μείωση των ποσοτήτων των Ο.Α. που διατίθενται ανεξέλεγκτα στο περιβάλλον με την παράλληλη αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης, επαναχρησιμοποίησης και των άλλων μορφών αξιοποίησης των υλικών αυτών.

Στο εν λόγω Π.Δ. τονίζεται ρητά ότι οι υπόχρεοι φορείς διαχείρισης των Ο.Α. είναι οι παραγωγοί των αντίστοιχων απορριμμάτων, οι οποίοι έχουν την υποχρέωση να οργανώνουν ατομικά συστήματα εναλλακτικής διαχείρισης ή να συμμετέχουν σε αντίστοιχα συλλογικά. Επίσης δίνονται στοιχεία για την έγκριση των συστημάτων αυτών και αναπτύσσεται το περιχόμενο των Προγραμμάτων Εναλλακτικής Διαχείρισης.

Οι βασικότερες αρχές που λαμβάνει υπόψη του το Π.Δ., αναφορικά με την διαχείριση των Ο.Α., είναι οι ακόλουθες:.

- Η αρχή της πρόληψης δημιουργίας απορριμμάτων.
- Η αρχή ο «ρυπαίνων πληρώνει».
- Η αρχή της ανάκτησης ενέργειας.
- Η αρχή της ανακύκλωσης.
- Η αρχή της επαναχρησιμοποίησης.
- Η αρχή της ευθύνης όλων όσων ασχολούνται με τη διαχείριση των Ο.Α.
- Η αρχή της δημοσιότητας προς τους χρήστες και καταναλωτές.

Οι ποσοτικοί στόχοι που έχουν τεθεί για την αξιοποίηση των Ο.Α., εξαιρουμένης της κατηγορίας 17 05 04 (χώματα και πέτρες εκσκαφών), συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία:

- α) μέχρι την 1^η Ιανουαρίου 2006 να αξιοποιείται κατ' ελάχιστο το 30% κατά βάρος των παραγόμενων απορριμμάτων, από το οποίο να ανακυκλώνεται τουλάχιστον 50%.
- β) μέχρι την 1^η Ιανουαρίου 2008 να αξιοποιείται κατ' ελάχιστο το 50% κατά βάρος των παραγόμενων απορριμμάτων, από το οποίο να ανακυκλώνεται τουλάχιστον 50%.
- γ) μέχρι την 1^η Ιανουαρίου 2015 να αξιοποιείται κατ' ελάχιστο το 80% κατά βάρος των παραγόμενων απορριμμάτων, από το οποίο να ανακυκλώνεται τουλάχιστον 50%.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αξιοποίηση των Ο.Α. στις μέρες μας εμφανίζεται ιδιαίτερα ελκυστική εξαιτίας των προφανών περιβαλλοντικών οφελών που προκύπτουν από την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση τους. Ακολούθως αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένα από τα οφέλη αυτά:

- ✓ Εξοικονόμηση πολύτιμων χώρων ταφής
- ✓ Περιορισμός της ανεξέλεγκτης απόρριψης των Ο.Α. και της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης που αυτή επιφέρει
- ✓ Εξοικονόμηση φυσικών πρώτων υλών
- ✓ Εξοικονόμηση κατανάλωσης ενέργειας λόγω μείωσης χρήσης φυσικών προϊόντων
- ✓ Εξυγίανση του κυκλώματος διακίνησης των υλικών αυτών

Από την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης στη χώρα μας προέκυψε ότι η διαχείριση των Ο.Α. βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο σε σχέση με άλλες χώρες της Ε.Ε. (Ολλανδία, Βέλγιο, Δανία, Γερμανία). Αιτίες αυτής της πραγματικότητας είναι αφενός η μεγάλη διαθεσιμότητα των φυσικών πρώτων υλών και αφετέρου το μηδαμινό κόστος εναπόθεσης των Ο.Α. σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Η εφαρμογή του νόμου 2939/2001 (και ειδικότερα του Π.Δ. που αναφέρεται στα Ο.Α.) είναι δυνατόν να παράσχει την πρώτη σοβαρή ώθηση για την έναρξη των προσπαθειών ανακύκλωσης των Ο.Α. στη χώρα μας. Στα πλαίσια της επικείμενης εφαρμογής του Π.Δ., η σύσταση ατομικών ή συλλογικών συστημάτων διαχείρισης των υλικών αυτών βρίσκεται προ των πυλών. Το γεγονός αυτό αναμένεται να επιφέρει δυναμική διείσδυση των προϊόντων ανακύκλωσης στις υφιστάμενες αγορές αδρανών υλικών.

Η ουσιαστική ενίσχυση των προσπαθειών ανακύκλωσης των Ο.Α. στην Ελλάδα μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή προτάσεων όπως α) η παροχή οικονομικών κινήτρων (π.χ. φορολογικές ελαφρύνσεις) στους φορείς ανακύκλωσης των Ο.Α., β) η θεσμοθετημένη υποχρέωση να περιέχει κάθε οικοδομικό υλικό δεδομένη αναλογία ανακυκλούμενων υλικών, γ) η ενημέρωση και ευαισθητοποίηση

των πολιτών υπέρ των φορέων που συμμετέχουν στην αξιοποίηση των Ο.Α., δ) η δημιουργία βάσης δεδομένων και ε) η πιστοποίηση των παραγόμενων προϊόντων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Symonds Group Ltd (1999) “Construction and Demolition management practices and their economic impacts”, Brussels.
2. Αβραμίκος Ηλίας (2002), “Διαχείριση των αποβλήτων που προέρχονται από κατασκευές και κατεδαφίσεις – Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης στην Ελλάδα”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ.
3. Ανακύκλωση (2002), “Απόβλητα από κατασκευές, κατεδαφίσεις και εσκαφές”, Τριμηνιαίο περιοδικό, Τεύχος 44.
4. Fatta D., A. Papadopoulos, E. Avramikos, E. Sgourou, K. Moustakas, F. Kourmoussis, A. Mentzis and M. Loizidou (2003) “Generation and management of Construction and Demolition waste in Greece - An existing challenge”, Resources, Conservation and Recycling, Volume 40, pp81-91.
5. LIFE 00 ENV/GR/000739, “Μονάδα Ανακύκλωσης Αδρανών Υλικών”, Πρόγραμμα LIFE – Περιβάλλον της Ε.Ε.
6. Cuperus J.G. and J. Boone (2003) “International experiences in the use of recycled aggregates”, Recycling and Reuse of Waste Materials, Proceedings of International Symposium, Dundee, pp383-387.
7. Καλδέλλης Ι.Κ. και Π. Κωνσταντινίδης (2003), “Σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα ανακύκλωσης οικοδομικών υλικών στην Ευρωπαϊκή Ένωση”, Πρακτικά συνεδρίου HELECO '03, σελ. 255-263, Αθήνα.
8. Οικόπολις (2004), “Εναλλακτική διαχείριση των στερεών αποβλήτων”, Διμηνιαίο περιοδικό, Τεύχος 4ο, σελ. 42-48.
9. Σχέδιο Προεδρικού Διατάγματος με θέμα “Μέτρα και όροι για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων από εκσκαφές, κατασκευές και κατεδαφίσεις. Πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση τους” (2003), Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.

ΣΧΕΔΙΟ ΕΘΝΙΚΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΕΦΡΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΑΣΒΕΣΤΙΟ – ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Ν. Κοϊμτσίδης

Πρόεδρος Τ.Ε.Ε./Τ.Δ.Μ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η έρευνα για τη χρήση των Ελληνικών τεφρών στο σκυρόδεμα έχει ξεκινήσει εδώ και μια πενήνταετία. Η πλήρης σχετικά συσσωρευμένη εμπειρία, οι πολλές επιτυχείς πιλοτικές εφαρμογές όπως η κατασκευή οδοστρωμάτων και προκατασκευασμένων προϊόντων σκυροδέματος, η πετυχημένη εφαρμογή εδώ και μία επταετία στην κατασκευή του φράγματος της Πλατανόβρυσης με χρήση ιπτάμενης τέφρας, τροφοδοτούμενη από την υποδομή του εργοστασίου άλεσης που λειτουργούσε στον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, η πληθώρα μελετών και ερευνητικών εργασιών από έγκριτους επιστημονικούς φορείς, δεν αφήνουν περιθώρια για αμφιβολίες των δυνατοτήτων αξιοποίησής της στις κατασκευές. Το Τ.Ε.Ε./Τ.Δ.Μ. εδώ και μια εικοσαετία έχει εκφράσει και επισημάνει τη θέση, πως η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να αποτελέσει ένα συγκριτικό πλεονέκτημα της περιοχής μας.

Λέξεις κλειδιά: ελληνική ιπτάμενη τέφρα, σχέδιο εθνικών προδιαγραφών

NATIONAL STANDARDS DRAFT FOR THE UTILIZATION OF HIGH CALCIUM FLY ASH – AN ACCOUNT OF THE DRAFTING PROCESS AND FUTURE PERSPECTIVES

N. Koimtsidis

Technical Chamber of Greece/T.D.M. President

ABSTRACT: Research on the use of Greek fly ashes in concrete has begun fifty years ago. The relatively adequate accumulated experience, the many successful demonstration projects like pavement construction and precast concrete products, the successful implementation of the Platanovryssi Dam seven years ago with fly ash provided by the milling plant that had been operating at Ptolemaida Power Plant, the great number of studies and research programmes from reputable scientific organizations, all leave no question over the potential for the utilization of Greek High Calcium Fly Ash in construction. The Technical Chamber of Greece for twenty years now has stated and emphasized on its position, that Fly Ash can become a comparative advantage for the region of West Macedonia.

Keywords: Greek high calcium fly ash, National Standards

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έρευνα για τη χρήση των Ελληνικών τεφρών στο σκυρόδεμα έχει ξεκινήσει εδώ και μια πεντηκονταετία. Η πλήρης σχετικά συσσωρευμένη εμπειρία, οι πολλές επιτυχείς πιλοτικές εφαρμογές όπως η κατασκευή οδοστρωμάτων και προκατασκευασμένων προϊόντων σκυροδέματος, η πετυχημένη εφαρμογή εδώ και μία επταετία στην κατασκευή του φράγματος της Πλατανόβρυσης με χρήση ιπτάμενης τέφρας, τροφοδοτούμενη από την υποδομή του εργοστασίου άλεσης που λειτουργούσε στον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, η πληθώρα μελετών και ερευνητικών εργασιών από έγκριτους επιστημονικούς φορείς, δεν αφήνουν περιθώρια για αμφιβολίες των δυνατοτήτων αξιοποίησής της στις κατασκευές.

Το Τ.Ε.Ε./Τ.Δ.Μ. εδώ και μια εικοσαετία έχει εκφράσει και επισημάνει τη θέση, πως η ιπτάμενη τέφρα μπορεί να αποτελέσει ένα συγκριτικό πλεονέκτημα της περιοχής μας.

Στις 15-16 Απριλίου 1983 είχε διοργανώσει μαζί με τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, *Δημερίδα* με θέματα την αξιοποίηση ιπτάμενης τέφρας και προβλήματα ρύπανσης στους λιγνιτικούς σταθμούς.

Από τότε παρακολουθούσε το θέμα, συμμετέχοντας ενεργά σε όλες τις προσπάθειες αξιοποίησης του υλικού, συμπεριλαμβάνοντας ταυτόχρονα την θέση του για ανάγκη αξιοποίησης της τέφρας, σε όλες τις προτάσεις του για το αναπτυξιακό μέλλον της περιοχής.

Διαπιστώνοντας την ωριμότητα του θέματος, όπως αυτή προκύπτει από τα παραπάνω αναφερόμενα, αλλά και το αδιέξοδο στο οποίο είχε οδηγηθεί το θέμα, το Τ.Ε.Ε./Τ.Δ.Μ. πραγματοποίησε **στις 7 Ιουλίου 2002 στην Κοζάνη** με επιτυχία **την 1^η ημερίδα** για τη χρησιμοποίηση της ιπτάμενης τέφρας σε προϊόντα σκυροδέματος, με στόχο την αποτελεσματική προώθηση αξιοποίησης της τέφρας με την σύνταξη Σχεδίου Εθνικών Προδιαγραφών.

Ομόφωνο συμπέρασμα της ημερίδας ήταν η πρότασή μας ότι η επιστημονική τεκμηρίωση σε επίπεδο έρευνας αλλά και πρακτικής εφαρμογής, για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγή τσιμεντοπροϊόντων και αόπλων κατασκευών σκυροδέματος, είναι πλήρης και ότι μπορούμε και πρέπει να προχωρήσουμε στη σύνταξη Σχεδίου Εθνικών Προδιαγραφών που αποτελεί το πρώτο και απαραίτητο βήμα για την αξιοποίησή της.

Σε υλοποίηση των συμπερασμάτων της ημερίδας, μετά από αίτημα της Δ.Ε. του Τμήματος, **συγκροτήθηκε στις 24-9-2002** από το Τ.Ε. Ε. Επιστημονική Επιτροπή για τη σύνταξη Σχεδίου Προδιαγραφών για την χρήση της ιπτάμενης τέφρας αποτελούμενη από έγκριτους ακαδημαϊκούς και ειδικούς επιστήμονες .

- Μετά την ολοκλήρωση του έργου της Επιστημονικής Επιτροπής το Τ.Ε.Ε./Τ.Δ.Μ. πραγματοποίησε **στις 10 Οκτωβρίου 2003 τη 2^η ημερίδα**, η οποία σηματοδότησε την έναρξη διαλόγου όλων των ενδιαφερόμενων και χρηστών σχετικά με το Σχέδιο Προδιαγραφών. Το Σχέδιο αυτό ανακοινώθηκε στο 14^ο Συνέδριο Σκυροδέματος που έγινε τον ίδιο μήνα στην Κω.

-Στη συνέχεια στα πλαίσια του πρωτοκόλλου συνεργασίας μεταξύ Τ.Ε.Ε./Τ.Δ.Μ. και Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης /Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Κausίμων,

στα πλαίσια δράσης που υλοποιεί το τελευταίο, μέσω του προγράμματος K Clusters, Ανάπτυξη νέων προϊόντων με τη χρήση τέφρας, συγκροτήθηκε διευρυμένη Ομάδας Εργασίας αποτελούμενη από μέλη της προηγούμενης Ομάδας Εργασίας και εκπροσώπους τσιμεντοβιομηχανιών και εμπλεκόμενων φορέων (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., ΕΛΟΤ, ΔΕΗ κλπ) με αντικείμενο τη συλλογή και αξιολόγηση των σχολίων των φορέων, ανάλυση των απαντήσεων τους και διαμόρφωση του παρόντος τελικού σχεδίου προδιαγραφών.

Το Σχέδιο ολοκληρώθηκε τον Νοέμβριο του 2004, διανεμήθηκε σ' όλους τους ενδιαφερόμενους και εμπλεκόμενους φορείς, αρχές, Εταιρείες και πρόσωπα και παρουσιάστηκε στην 3^η ημερίδα που έγινε στις 22 Ιανουαρίου 2005, κύριος στόχος της οποίας ήταν, με την παρουσίαση των θέσεων και των προθέσεων όλων των εμπλεκόμενων φορέων, κυρίως της ΔΕΗ που αποτελεί τον παραγωγό των ιπτάμενων τεφρών της χώρας μας, να δρομολογηθούν οι απαιτούμενες ενέργειες για την αξιοποίησή τους με :

-Τη θεσμοθέτηση του Σχεδίου Εθνικών Προδιαγραφών από την Ελληνική Πολιτεία

- και, τις αποφάσεις για τα επιχειρηματικά σχήματα που θα αναλάβουν την παραγωγή και τη διάθεση των ιπτάμενων τεφρών.

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Στη χώρα μας παράγονται από την καύση των λιγνιτών στους ΑΗΣ σημαντικές ποσότητες ιπτάμενων τεφρών. Το 2003 παράχθηκαν στην χώρα μας περίπου 12 εκ τόνοι τέφρας, περίπου 1 τόνος τέφρας ανά άτομο. Σήμερα 10% της παραγόμενης τέφρας αγοράζεται και αξιοποιείται από την τσιμεντοβιομηχανία για την παραγωγή blended type τσιμέντων με τιμή αγοράς 2,5 Ευρώ ανά τόνο.

Το υπόλοιπο 90% της παραγόμενης τέφρας, οδηγείται με ταινιόδρομους στις αποθέσεις των λιγνιτορυχείων, για τη σταθεροποίηση των πρανών και την πλήρωση των κενών των εξαντλημένων ορυχείων, δημιουργώντας, σύμφωνα με υπάρχουσες απόψεις, αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, με την επιβάρυνση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα αλλά και την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας από αιωρούμενα σωματίδια. Σημειώνεται ότι το κόστος μεταφοράς και απόθεσης ανέρχεται σε περίπου 1,5 Ευρώ ανά τόνο.

Με δεδομένες τις ποσότητες της διατιθέμενης τέφρας, τις ιδιαιτερότητες χημικής σύστασης των ελληνικών ιπτάμενων τεφρών, που χαρακτηρίζονται από μεγάλη περιεκτικότητα σε οξείδιο του ασβεστίου, τα θετικά αποτελέσματα που στην πράξη απέδειξαν οι ποικίλες έρευνες και εφαρμογές, τις προβλέψεις του Σχεδίου Προδιαγραφών της Διευρυμένης Επιτροπής Επιστημόνων, χρηστών και φορέων, η κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα μπορεί να διατίθεται στις παρακάτω εφαρμογές:

- Μαζικές κατασκευές (τοίχοι αντιστήριξης, φράγματα, μπλόκια)
- Δύσκαμπα οδοστρώματα, πίστες αεροδρομίων
- Διαχωριστικά δρόμων, New Jersey
- Κρασπεδορείθρα οδών, διαμόρφωση και κοιτοστρώσεις γηπέδων
- Προϊόντα σκυροδέματος όπως: τριγωνικές τάφροι, στραγγιστήρια, κράσπεδα, κυβόλιθοι, πλάκες πεζοδρομίου, άοπλοι τσιμεντοσωλήνες
- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για επισκευές και σταθεροποίηση σηράγγων

Σύμφωνα με επίσημα στοιχεία που είναι γνωστά, η απορρόφηση σε διάφορες χρήσεις της παραγόμενης στην Ευρώπη τέφρας, φτάνει σήμερα, κατά μέσο όρο περίπου στο 50%. Εν σχέσει με το 10% που απορροφάται σήμερα στην Ελλάδα είναι εμφανή τα περαιτέρω περιθώρια αξιοποίησής της στη χώρα μας.

Οι δυνατότητες κατανάλωσης επεξεργασμένης τέφρας για προϊόντα αόπλου σκυροδέματος και κοιτοστρώσεις μόνο στην Περιφέρεια Δυτ. Μακεδονίας για τα σημερινά παραγόμενα προϊόντα, εκτιμάται ότι θα είναι 25-30 χιλ. τόνοι ανά έτος.

Για το νομό Θεσσαλονίκης (150χλμ από Πτολεμαΐδα μέσω Εγνατίας), η συνολική κατανάλωση εκτιμάται ότι θα είναι περίπου 70 χιλ. τόνοι.

Σύνολο Δυτ. Μακεδονίας και Νομού Θεσσαλονίκης εκτιμάται ότι θα είναι περίπου 100 χιλ. τόνοι ανά έτος.

Οι νομοί Λάρισας – Βέροιας – Έδεσσας είναι σε ίδια ή μικρότερη απόσταση από τη Θεσσαλονίκη και μπορούν να απορροφήσουν επιπλέον ποσότητες.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το σύνολο της παραγωγής του μύλου άλεσης της τέφρας (165.000 τόνοι ετησίως) μπορεί να απορροφηθεί από όμορους Νομούς.

Στις παραπάνω ποσότητες είναι δυνατόν να προστεθούν ειδικά έργα που απαιτούν μεγάλες ποσότητες, όπως φράγματα στην περιφέρειά μας. Στη Δυτ. Μακεδονία κατασκευάζονται ήδη 4 σχετικά μικρά φράγματα μέσω του ΠΕΠ Δυτ. Μακεδονίας.

Είναι δυνατόν επίσης να χρησιμοποιηθεί η τέφρα στην παραγωγή προκατασκευασμένων ολισθητήρων στο πλαίσιο του προγράμματος εκσυγχρονισμού υποδομής του ΟΣΕ, στην κατασκευή τμημάτων της Εγνατίας Οδού (Παναγιά –Γρεβενά, Σιάτιστα –Κωσταράζι κλπ)

ΟΦΕΛΗ

Με την υιοθέτηση του Σχεδίου και την εφαρμογή της χρήσης της ιπτάμενης τέφρας, τα οφέλη για την περιοχή και τη χώρα μας θα είναι τα παρακάτω:

- Εξασφαλίζονται σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη με την ορθολογοποίηση εκμετάλλευσης ενός φυσικού πόρου, του λιγνίτη, με την αξιοποίηση του σημαντικότερου παραπροϊόντος του, κάτι που επιβάλλεται από τις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης. Μόνο από την αξιοποίηση 165.000 τόνων τέφρας που αποτελεί τη ετήσια παραγωγή του ενός υφιστάμενου Μύλου, προκύπτει ετήσια μείωση εκπομπών CO₂ 80.000 τόνων περίπου. Το γεγονός κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό πέρα από προφανείς περιβαλλοντικούς λόγους και για επιχειρηματικούς λόγους δεδομένου του Εθνικού Σχεδίου Κατανομής δικαιωμάτων Εκπομπών που θα πρέπει να εφαρμόζεται στο πλαίσιο του πρωτοκόλλου του Κιότο από φέτος στην χώρα μας.

- Επιτυγχάνεται οικονομία κατασκευών σε εθνικό επίπεδο, μέσα από την μείωση του κόστους παραγωγής ειδικής κατηγορίας σκυροδέματος, με θετικές επιπτώσεις στην εθνική οικονομία.

- Δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας στην πρωταθλήτρια σε ανεργία περιφέρειά μας, στηριζόμενες στην αξιοποίηση τοπικού διαθέσιμου «πόρου» της περιοχής μας, γεγονός που αποτελεί βασική αρχή ορθολογικής ανάπτυξης μιας περιοχής που οφείλει πρώτα απ' όλα να εκμεταλλεύεται πλήρως τα συγκριτικά πλεονεκτήματά της. Σύμφωνα με μελέτη του ΙΤΕΣΚ, από τη λειτουργία του υπάρχοντος μύλου που μπορεί να παράγει 165.000 τόνους το χρόνο, δημιουργούνται 30 περίπου θέσεις εργασίας. Προοπτική εφικτού στόχου παραγωγής 1.000.000 τόνων ετησίως, με τη δημιουργία και άλλων μύλων παραγωγής επεξεργασμένης τέφρας θα δημιουργούσε π.χ. $6 * 30 = 180$ θέσεις εργασίας. Η δυσάρεστη προοπτική πιθανής περαιτέρω μείωσης της απασχόλησης, με τις διαφαινόμενες αρνητικές εξελίξεις στο χώρο των λιγνιτικών μονάδων της ΔΕΗ στην περιοχή μας, εξελίξεις που βρίσκουν αντίθετο το Τ.Ε.Ε./Τ.Δ.Μ., πρέπει να ευαισθητοποιήσουν την τοπική κοινωνία να απαιτήσει την ενεργοποίηση της ΔΕΗ και στην κατεύθυνση αυτή.

- Η αποκτηθείσα εμπειρία και πρόοδος της εφαρμοσμένης έρευνας στον τομέα αυτό, θα δώσει ώθηση στο άξιο και ανεκμετάλλευτο ερευνητικό δυναμικό της χώρας μας, να προχωρήσει με αυτοπεποίθηση σε άλλους τομείς, με ότι αυτό συνεπάγεται για την πρόοδο της χώρας μας στον ερευνητικό τομέα που αναγνωρισμένα, για λόγους που δεν είναι του παρόντος, παρουσιάζει μεγάλη υστέρηση στην χώρα μας, σε σχέση με τις λοιπές και όχι μόνο ευρωπαϊκές χώρες .

ΑΠΟ ΤΟ ΣΧΕΔΙΟ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Αξιότιμες κυρίες και κύριοι

Ποιος θα μπορούσε να αμφισβητήσει όλα τα παραπάνω;

Το μεγάλο κρίσιμο βήμα στην κατεύθυνσή αξιοποίησης της τέφρας έχει ολοκληρωθεί με την ολοκλήρωση του Σχεδίου Εθνικών Προδιαγραφών με την συναίνεση όλων των εμπλεκόμενων και ενδιαφερόμενων πλευρών.

Τι μέλλει όμως γενέσθαι από εδώ και εμπρός;

Δύο είναι τα κρίσιμα ζητήματα για τα οποία καλούνται, όπως αναφέρθηκαν σύμφωνα με τον στόχο της ημερίδας, να πάρουν όλοι θέση και κυρίως η ΔΕΗ, σχετικά με τις προθέσεις τους, αναγνωρίζοντας τις ευθύνες τους.

A) Η θεσμοθέτηση του Σχεδίου Εθνικών Προδιαγραφών από την ελληνική πολιτεία

Για τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας στην χώρα μας, το Σχέδιο θα πρέπει να θεσμοθετηθεί από την ελληνική Πολιτεία, με παράλληλη προώθησή του για έγκριση στον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Τεχνικών Εγκρίσεων (EOTA) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής προκειμένου να ενταχθεί στο υπάρχον Ευρωπαϊκό Πρότυπο που όπως είναι γνωστό δεν εμπεριέχει τα χαρακτηριστικά των ελληνικών τεφρών.

Ως πιο πρόσφορη διαδικασία θεσμοθέτησης από την Ελληνική Πολιτεία προτάθηκε αυτή που ακολουθήθηκε για τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμένου Σκυροδέματος, με έκδοση Υπουργικής Απόφασης. Στην περίπτωση αυτή η σχετική διαδικασία θα διαρκέσει περίπου 6 μήνες.

Επισημαίνεται στο σημείο αυτό ότι το ενδιαφέρον της ΔΕΗ ως ιδιοκτήτης και παραγωγός του παραπροϊόντος θα ήταν καταλυτικό για το θέμα.

B) Προετοιμασία Επιχειρηματικών Σχεδιασμών για την παραγωγή και την διάθεση του προϊόντος.

Αποτελεί το δεύτερο σημαντικό βήμα αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας. Και στον τομέα αυτό, κομβικός είναι ο ρόλος της ΔΕΗ ως παραγωγός του παραπροϊόντος. Για την παραγωγή του προϊόντος σύμφωνα με τις προδιαγραφές, θα πρέπει η ΔΕΗ να πάρει τις αποφάσεις της για την λειτουργία και τους λειτουργούς του υφιστάμενου μύλου παραγωγής και αργότερα νέων μύλων επεξεργασίας.

Τέλος σημειώνεται ότι το Τ.Ε.Ε. υιοθέτησε το Σχέδιο Προδιαγραφών και μαζί με το Περιφερειακό Τμήμα της Δυτικής Μακεδονίας έχουν κάνει τις σχετικές ενέργειες με επιστολές και ενημερωτικές επαφές προς το ΥΠΕΧΩΔΕ και προς τη ΔΕΗ (το θέμα έχει διαβιβαστεί από τις 28-3-2005 προς το ΥΠΕΧΩΔΕ).

Η ΔΕΗ έχει εκφράσει τη θετική της στάση στην προοπτική αξιοποίησης του παραπροϊόντος θέτει όμως ως προϋπόθεση τη θεσμοθέτηση του Σχεδίου από την Ελληνική Πολιτεία.

Αξιότιμοι κυρίες και κύριοι,

Εύχομαι και ελπίζω, η όλη αυτή προσπάθεια με τη στήριξη όλων μας να έχει αίσιο τέλος με τη θεσμοθέτηση του Σχεδίου από την Πολιτεία, την υλοποίηση και εφαρμογή του στην πράξη σε επίπεδο παραγωγής και την απαραίτητη διαφήμιση, προβολή και προώθηση του προϊόντος στην αγορά.

ΤΕΧΝΙΚΕΣ, ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΜΠΕΙΡΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΑΠΟ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΝΕΣΤΟ

Ι.Π. Στεφανάκος¹, Π.Ι. Τσικνάκου²

¹Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, e-mail:jstef@tee.gr, ²Πολιτικός Μηχανικός, e-mail:ytsik@tee.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Ξεκινώντας στις 18 Οκτωβρίου του 1995, ολοκληρώθηκε στις 10 Μαρτίου του 1997 η κατασκευή του σώματος του Φράγματος Πλατανόβρυσης από Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα (RCC), στον ποταμό Νέστο, με τη χρήση επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας από το θερμοηλεκτρικό σταθμό Πτολεμαΐδας, ως κύριου συνεκτικού συστατικού του μίγματος. Το εγχείρημα ήταν πρωτοποριακό όχι μόνο για τα ελληνικά αλλά και για τα παγκόσμια τεχνικά δεδομένα. Για τη σύνθεση του κυλινδρούμενου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν 225 kg/m³ επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα και 50 kg/m³ τσιμέντο πόρτλαντ (I-45). Η τέφρα μεταφέρθηκε στη θέση του έργου από την Πτολεμαΐδα (απόσταση 365 km). Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται οι τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνιστώσες του εγχειρήματος και οι αντίστοιχες εμπειρίες και συμπεράσματα από την κατασκευή του έργου.

Λέξεις κλειδιά: κυλινδρούμενο σκυρόδεμα, τέφρα, φράγμα Πλατανόβρυσης

TECHNICAL, ECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL ASPECTS AND CONCLUSIONS, RESULTING FROM THE USE OF FLY-ASH IN THE CONCRETE MIX FOR THE CONSTRUCTION OF PLATANOVRYSSI RCC DAM.

J. Stefanakos¹, P. Tsiknakou²

¹*Civil Engineer PhD e-mail:jstef@tee.gr*, ²*Civil Engineer, e-mail:ytsik@tee.gr*

ABSTRACT: The construction of Platanovryssi RCC Dam, on the Nestos River (Eastern Macedonia), started on the 18th of October 1995 and finished on the 10th of March 1997. In the concrete mix, large quantities of treated fly-ash were used, transported from Ptolemais Lignite Plants, at a distance of 365 km. The project represents a pioneer technical experience, not only in Greece but worldwide. In this paper are presented the technical, economical and environmental aspects and conclusions from Platanovryssi dam construction.

Key words: roller compacted concrete, fly ash, Platanovryssi Dam

ΙΣΤΟΡΙΚΟ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη και κατασκευή του φράγματος Πλατανόβρυσης ήταν οπωσδήποτε πρωτοποριακό εγχείρημα.

Τι θα μπορούσαμε όμως να πούμε σήμερα, οκτώ χρόνια μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος ;

Γιατί δεν επαναλήφθηκαν στον ελλαδικό χώρο ανάλογες εφαρμογές;

Το φράγμα της Πλατανόβρυσης κατασκευάστηκε στον ρου του ποταμού Νέστου και αποτελεί τη δεύτερη βαθμίδα ενεργειακής αξιοποίησης, ευρισκόμενο κατάντη του ήδη λειτουργούντος υδροηλεκτρικού έργου Θησαυρού και ανάντη του υδροηλεκτρικού έργου Τεμένους, η κατασκευή του οποίου έχει ανασταλεί από τη ΔΕΗ.

Το έναυσμα που οδήγησε στην αναζήτηση λύσεως φράγματος εκ σκυροδέματος στη θέση της Πλατανόβρυσης προήλθε κατ' αρχήν από την δραματική αναθεώρηση της πλημμύρας σχεδιασμού του ανάντη φράγματος του Θησαυρού.

Το φράγμα Θησαυρού, λιθόρριπτο ύψους 180m, με αργιλικό πυρήνα, είχε μελετηθεί σε φάση Προμελέτης με μέγιστη πλημμύρα σχεδιασμού 3.500 m³/sec. Κατά τη φάση δημοπράτησης, περίοδος 1979-1982, η πλημμύρα αυτή αναθεωρήθηκε σε 10.000 m³/sec, με αποτέλεσμα τόσο το ίδιο το έργο του Θησαυρού όσο και τα κατάντη του έργα να απαιτούν γενικότερη επανεξέταση στη φιλοσοφία σχεδιασμού τους.

Το φράγμα Πλατανόβρυσης έχει χαμηλότερο ύψος της τάξεως των 100 m και η δυνατότητα κατασκευής του ως λιθόρριπτου με αργιλικό πυρήνα, είχε αποκλεισθεί εξ αρχής, λόγω έλλειψης των καταλλήλων υλικών στην ευρύτερη περιοχή του έργου.

Μετά δε και την αναθεώρηση των μεγεθών της μέγιστης πλημμύρας του Θησαυρού η επιλογή φράγματος από σκυρόδεμα για την Πλατανόβρυση ήταν ουσιαστικά μονόδρομος, δεδομένου ότι έτσι όλο το μήκος του φράγματος θα λειτουργούσε ως υπερχειλιστής και θα απεφεύγετο ένα υπέρογκο κόστος δημιουργίας διώρυγας υπερχειλιστού στο πρανάς, το οποίο καθιστούσε το όλο έργο οικονομικά μη βιώσιμο.

Η κατασκευή όμως φράγματος εκ σκυροδέματος συμβατικού τύπου (δηλαδή με οπλισμένο σκυρόδεμα) δεν ήταν απλή λύση. Το υψηλό κόστος και το μεγάλο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της κατασκευής, καθώς και οι ειδικές απαιτήσεις ψύξεως, δόνησης και διάστρωσης του σκυροδέματος έκαναν τα φράγματα αυτού του τύπου μη οικονομικά. Ήδη από τη δεκαετία του 1960 οι μηχανικοί αναζητούσαν απλούστερες εναλλακτικές λύσεις.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το φράγμα Alpe Gera της Ιταλίας, ύψους 172μ, στο οποίο αποτολμήθηκε αφενός η μείωση της περιεκτικότητας τσιμέντου στο εσωτερικό τμήμα της διατομής του φράγματος, στο οποίο δεν υφίσταται κίνδυνος μείωσης της ανθεκτικότητας (durability) και αφετέρου η διάστρωση σε οριζόντιες στρώσεις, αντί των κατακορύφων προβόλων, που ήσαν η εφαρμοζόμενη πρακτική. Η κατασκευή του φράγματος ολοκληρώθηκε το 1964.

Ακολούθησαν παρόμοιες εφαρμογές στον Καναδά και στις ΗΠΑ, κυρίως σε χαμηλά αντιπλημμυρικά αναχώματα.

Η επανάσταση όμως στη μέθοδο κατασκευής φραγμάτων εκ σκυροδέματος, η οποία οδήγησε στη μετεξέλιξη του κυλινδρούμενου σκυροδέματος ήταν οι απαιτήσεις για εκτεταμένες εργασίες επισκευής στο φράγμα Tarbela του Πακιστάν. Από το 1974 έως το 1986 τοποθετήθηκαν 2,66 εκατ. m^3 για αντιστήριξη του δεξιού αντερείσματος στην είσοδο της σήραγγας προσαγωγής και για προστασία της λεκάνης αποτόνωσης στην έξοδο των εκχειλιστών.

Έκτοτε αρχίζει ευρύτατη εφαρμογή των φραγμάτων από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα.

Διακρίνονται παγκοσμίως τρεις διαφορετικές φιλοσοφίες κατασκευής:

α) Φράγματα από ισχνό σκυρόδεμα (lean concrete). Στα φράγματα αυτά η περιεκτικότητα σε υδραυλικές κονίες (τσιμέντο – ποζολάνη) είναι περιορισμένη ($50\text{--}60 \text{ kg/m}^3$) και δεν υπερβαίνει τα 100 kg/m^3 . Επίσης τα αδρανή περιέχουν μεγάλες ποσότητες λεπτοκόκκων.

Τα φράγματα αυτά, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο, εμφανίζουν το πλεονέκτημα της πλήρως ελεγχόμενης εξώθερμης αντίδρασης, αλλά μειονεκτούν λόγω χαμηλής συνάφειας μεταξύ των στρώσεων (ύψους συνήθως 30 cm) και υψηλής διαπερατότητας.

Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν αφενός μεν με την χρήση ειδικών μειγμάτων υψηλής περιεκτικότητας σε τσιμέντο μεταξύ των στρώσεων (bedding mixes) και αφετέρου με την κατασκευή αδιαπέρατης ανάντη όψεως, έτσι ώστε το ισχνό σκυρόδεμα στο εσωτερικό του φράγματος να χρησιμεύει απλά για την συγκράτηση του ανάντη σώματος.

β) Φράγματα με την Ιαπωνική μέθοδο κατασκευής (RCD Dams)

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται αποκλειστικά στην Ιαπωνία. Το σκυρόδεμα περιέχει υδραυλικές κονίες $120\text{--}130 \text{ kg/m}^3$, τοποθετείται σε οριζόντιες στρώσεις 50 – 100 cm και συμπτυκνύεται με δονητικούς κυλινδρουσμπιεστές ανά τρεις έως τέσσερις στρώσεις. Ανά 15m δημιουργούνται κατακόρυφοι αρμοί για αποφυγή θερμοκρασιακών ρηγματώσεων.

Η ανάντη και η κατάντη όψη καλύπτεται με σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας για εξασφάλιση στεγανότητας και προστασίας έναντι καιρικών συνθηκών (freeze and thaw attack). Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν ανάντη και φύλλα χαλκού ως στεγανωτικά.

γ) Φράγματα με υψηλή περιεκτικότητα υδραυλικών κονιών (High paste RCC Dams)

Η μέθοδος αυτή κατασκευής φραγμάτων ξεκίνησε κυρίως από εκτεταμένες εργαστηριακές έρευνες στο Ηνωμένο Βασίλειο, αφού προηγήθηκε έρευνα από την Tennessee Valley Authority στις αρχές του 1970.

Τα αρχικώς κατασκευασθέντα φράγματα στην Αμερική από ισχνό σκυρόδεμα και τα προβλήματα συνοχής και διαπερατότητας τα οποία εμφάνισαν, οδήγησαν καταρχήν σε αύξηση του ποσοστού τσιμέντου και τέφρας στο μίγμα. Έτσι, ενώ το πρώτο φράγμα που μελετήθηκε από το US Corps of Engineers το Willow Creek είχε 67 kg/m^3 (τσιμέντο+τέφρα), το δεύτερο το Elk Creek είχε 103 kg/m^3 (τσιμέντο + τέφρα). Η ίδια εξέλιξη στην αύξηση του ποσοστού των υδραυλικών κονιών εμφανίσθηκε και σε τρία φράγματα της Αυστραλίας, που κατασκευάσθηκαν κατά την ίδια περίοδο (1980-1990):

Η πορεία αυτή των διερευνήσεων οδήγησε στην μελέτη και κατασκευή του φράγματος Upper Stillwater στην Αμερική ύψους 90 m, όγκου $1.070.000 \text{ m}^3$, το οποίο περιείχε στο μίγμα σκυροδέματος 79 kg/m^3 τσιμέντο και 173 kg/m^3 τέφρα (τύπου F), δηλ. σύνολο υδραυλικών κονιών 252 kg/m^3 .

Το έργο αυτό ολοκληρώθηκε το 1987 και αποτέλεσε πρότυπο για την προώθηση των κυλινδρούμενων φραγμάτων αυτού του τύπου.

ΦΡΑΓΜΑ ΠΛΑΤΑΝΟΒΡΥΣΗΣ

Επιλογή τύπου φράγματος – Οικονομικοτεχνικά κριτήρια

Οι αρχικές μελέτες του έργου ξεκίνησαν το 1987 και ήδη το 1989 ξεκίνησε η κατασκευή του έργου με τη διάνοιξη της σήραγγας εκτροπής.

Ο προσανατολισμός των Μελετητών της Διεύθυνσης Υδροηλεκτρικών της ΔΕΗ στην επιλογή φράγματος από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα προσέκρουε σε άλλες απόψεις, που έβλεπαν τη συγκεκριμένη τεχνολογία με επιφύλαξη και την έκριναν μη δόκιμη και μάλιστα για ένα φράγμα 95 μ ύψους.

Τα οικονομικοτεχνικά όμως κριτήρια, όπως αναφέρεται στη συνέχεια, λειτουργούσαν συντριπτικά υπέρ της συγκεκριμένης επιλογής.

Συνοπτικά καταγράφονται τα εξής:

- Ο όγκος της διατομής του φράγματος (φράγμα βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα) είναι σημαντικά μικρότερος, συγκρινόμενος με χωμάτινο ή λιθόρριπτο φράγμα, σύμφωνα με την διεθνή εμπειρία που απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Έτσι για ύψος φράγματος 95 m και μήκος στέψεως 300 m, που είναι τα χαρακτηριστικά της Πλατανόβρυσης προκύπτουν τα εξής συγκριτικά στοιχεία όγκου, για κάθε υποθετικό τύπο φράγματος:

Χωμάτινο: $2,50 \times 10^6 \text{ m}^3$

Λιθόρριπτο: $1,50 \times 10^6 \text{ m}^3$

Κυλινδρούμενο βαρύτητας: $0,45 \times 10^6 \text{ m}^3$

(Οι εκτιμήσεις αυτές δεν έλαβαν βέβαια υπόψη ότι η απουσία καταλλήλων υλικών στην περιοχή, καθιστούσε τη λύση του λιθόρριπτου ανέφικτη).

Οι διαφορές αυτές στον απαιτούμενο όγκο φράγματος, πέραν των οικονομικών επιβαρύνσεων, επηρεάζουν εξαιρετικά και τον χρόνο ολοκλήρωσης του έργου και συνεπώς και την ημερομηνία έναρξης της εμπορικής λειτουργίας. Ένας χρόνος καθυστέρησης (στην πραγματικότητα οι χρόνοι είναι τουλάχιστον διπλάσιοι), για ενεργειακή παραγωγή 200 GWh το έτος, που είναι η παραγωγή του έργου της Πλατανόβρυσης και με τιμή kwh αιχμής 50€/ MWh* , δίδει ετήσια απώλεια 10.000.000 €.

*(θεωρητική εκτίμηση, δεδομένου ότι οι ισχύοντες Κώδικες Συναλλαγών και Διαχείρισης Ηλεκτρικής Ενέργειας δεν προβλέπουν κοστολόγηση της παραγόμενης ενέργειας από μεγάλο υδροηλεκτρικό. Η επιλεγείσα τιμή αντιπροσωπεύει τη μέση οριακή τιμή συστήματος για τις ώρες αιχμής στην παρούσα περίοδο, ενώ στη φάση λήψεως των αποφάσεων για το έργο της Πλατανόβρυσης, γινόταν σύγκριση με εναλλακτικό του υδροηλεκτρικού έργο, που ήσαν οι πετρελαϊκές ή οι αεριοστροβιλικές Μονάδες, για τις οποίες η τιμή της MWh ήταν αντίστοιχα 16.000 και 25.000 δρχ., δηλαδή 47€ και 73€ αντίστοιχα).

- Η επιλογή φράγματος από σκυρόδεμα δίδει τη δυνατότητα κατάργησης ή σημαντικού περιορισμού των μεγάλων και δαπανηρών κατασκευών, που είναι οι εκχειλιστές – διώρυγες επί των αντρευσμάτων του φράγματος. Στο έργο της Πλατανόβρυσης το κόστος του εκχειλιστή, μέσω του οποίου θα διοχετεύετο η εισερχόμενη πλημμύρα σχεδιασμού (7330 m³/sec) εφόσον δεν

κατασκευαζόταν υπερπηδητό φράγμα, είχε εκτιμηθεί σε 4 δις δρχ, δηλαδή αντιπροσώπευε το 30% των έργων πολιτικού μηχανικού.

Με την επιλογή φράγματος από σκυρόδεμα ήταν δυνατή η διοχέτευση 5300 m³/sec πάνω από το σώμα του φράγματος. Το υπόλοιπο σχεδιάστηκε να διοχετευθεί μέσω εκχειλιστή σήραγγα.

Φράγμα όμως από σκυρόδεμα εννοείτο πλέον διεθνώς αυτό με κυλινδρούμενο, διότι η λύση με συμβατικό ήταν εξαιρετικά δαπανηρή και χρονοβόρα (Σχήμα 2)

Για τον όγκο του φράγματος Πλατανόβρυσης 450.000 m³ ή 592.000 yd³, προέκυπτε, με τα συγκριτικά στοιχεία της περιόδου εκείνης, κόστος κυλινδρούμενου 24 \$/ yd³ και κόστος συμβατικού 51 \$/ yd³.

- Η δυνατότητα προσθήκης ιπτάμενης τέφρας στο μίγμα του κυλινδρούμενου, η συσσώρευση της οποίας στους χώρους λειτουργίας των θερμοηλεκτρικών σταθμών, προξενούσε ανέκαθεν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα στη ΔΕΗ, η οποία κατά καιρούς αναζητούσε μετ' επιτάσεως τρόπους διάθεσης του παραπροϊόντος αυτού.

Όλες αυτές οι παράμετροι κατέστησαν την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου φράγματος ουσιαστικά μονόδρομο.

Κριτήρια μελέτης και σχεδιασμού φράγματος

Η διερεύνηση της διεθνούς αγοράς και η αναζήτηση εμπείρου Συμβούλου οδήγησε τότε τη ΔΕΗ (Νοέμβριος 1988), στην συνεργασία με τον Βρετανό Σύμβουλο Malcolm Dunstan, ο οποίος είχε μακρόχρονη εμπειρία αντίστοιχων ερευνητικών προγραμμάτων στη Μεγάλη Βρετανία και στις ΗΠΑ και μάλιστα στην κατεύθυνση προσθήκης υψηλών ποσοτήτων υδραυλικών κονιών στο μίγμα σκυροδέματος.

Η ευτυχής συγκυρία ήταν ότι ο Malcolm Dunstan συνέστησε στη ΔΕΗ την Ιωάννα Παπαγιάννη, ως εξειδικευμένη στη χρήση ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με τις σχετικές δημοσιεύσεις και παρουσιάσεις της ίδιας σε διεθνή συνέδρια. Η Ιωάννα Παπαγιάννη είχε ήδη συγκεντρώσει μια πολύχρονη εμπειρία λόγω εμπειριστατωμένης ενασχόλησης με τη χρήση της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς στην περιοχή Κοζάνης – Πτολεμαΐδας.

Το σημαντικό της έρευνας αυτής αφορούσε τη χρήση τέφρας στο σκυρόδεμα ως «τέταρτου» υλικού στο μίγμα, (πλέον του τσιμέντου, των αδρανών και του νερού), για μερική υποκατάσταση του τσιμέντου.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η τέφρα Πτολεμαΐδας είναι υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (high calcium fly ash), που συχνά ήταν της τάξεως του 40% και κατατάσσεται σε ιδιαίτερη κατηγορία (Class C) στα πρότυπα ASTM. Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο η προσθήκη των τεφρών αυτών στο σκυρόδεμα, του προσδίδει υψηλές αντοχές σε πρώιμες ηλικίες, λόγω του περιεχομένου ελεύθερου ασβεστίου, με παράλληλη όμως ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών ενυδάτωσης.

Με επίγνωση λοιπόν των δυσκολιών του όλου εγχειρήματος, ακολούθησε ευρύ πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, τόσο με ακατέργαστη τέφρα Πτολεμαΐδας όσο και με αλεσμένη σε υπάρχοντα αυτοσχέδιο εργαστηριακό μύλο στους χώρους του θερμοηλεκτρικού σταθμού. Παράλληλα απεστάλη υλικό σε βρετανικά εργαστήρια για την

εκτέλεση ειδικών δοκιμών που αφορούσαν κυρίως τη θερμική συμπεριφορά του μείγματος και μάλιστα με αλεσμένη τέφρα, η οποία υπέστη και υδρόλυση με έγχυση νερού υψηλής θερμοκρασίας.

Εξετάστηκε επίσης η συμπεριφορά του φράγματος σε δυναμική καταπόνηση για σεισμική επιτάχυνση 0,384g, αφού ολοκληρώθηκε το σύνολο του σχεδιασμού του έργου από τους μελετητές της ΔΕΗ και οριστικοποιήθηκε η διατομή του φράγματος (Σχήμα 3).

Κρίσιμο στοιχείο στην όλη θεώρηση ήταν η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή μεταξύ των οριζοντίων στρώσεων του κυλινδρούμενου σκυροδέματος, ώστε να ανθίσταται το φράγμα στη σεισμική καταπόνηση. Η απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή προέκυψε 2.2 MPa και ως εκ τούτου η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή κύβου 91 ημερών 39 MPa.

Τελικά το καλοκαίρι του 1989 και μετά την ολοκλήρωση των επί μέρους εξειδικευμένων ερευνών ελήφθη η κομβική απόφαση:

Το φράγμα Πλατανόβρυσης θα κατασκευαστεί με μίγμα σκυροδέματος περιέχον υψηλά ποσοστά κατεργασμένης ιπτάμενης τέφρας (άλεση και υδρόλυση), παρόλο που αυτού του είδους η εφαρμογή ήταν πρωτότυπη παγκοσμίως.

Οι απαιτούμενες ποσότητες κατεργασμένης τέφρας υπολογίστηκαν περίπου σε 150.000 t.

Οι συνθέσεις που οριστικοποιήθηκαν για τις τρεις διαφορετικές κατηγορίες σκυροδεμάτων (κυλινδρούμενο, επιφάνειας θεμελίωσης και στοιχείων όψευς) ήσαν:

Πίνακας 1. Συνθέσεις σκυροδεμάτων						
	Free water (kg/m ³)	Portland Cement I-45 (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Fine aggregates (kg/m ³)	Coarse aggregates (kg/m ³)	Max. aggr. size (mm)
RCC	128	50	225	607	1350	50
Leveling	187	100	225	676	1057	50
Facing	173	140	175	753	957	20

Η συνεκτικότητα των μιγμάτων ελέγχθηκε με τροποποιημένη συσκευή Ve Be. Ο απαιτούμενος χρόνος καθορίστηκε σε 15 sec.

Συγκρότημα άλεσης ιπτάμενης τέφρας

Οι μελετητές της ΔΕΗ συνέταξαν στη συνέχεια τις Προδιαγραφές για την κατασκευή του συγκροτήματος άλεσης ιπτάμενης τέφρας, με τη συμβολή ξένων Συμβούλων και πρόσθετων ερευνών.

Μετακαλείται προς τούτο ομάδα Αμερικανών καθηγητών από τους κκ. Ο. Manz και J. Lagouros, οι οποίοι είχαν εξειδικευθεί στη χρήση παρομοίου τύπου τεφρών στο σκυρόδεμα, καθώς και έμπειρα στελέχη τσιμεντοβιομηχανιών του εξωτερικού (Δανοί και Ιταλοί) και παρουσιάζεται σε αυτούς το ευρύ πρόγραμμα καταγραφής των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων της παραγόμενης τέφρας από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, που εκτελέσθηκε την περίοδο 1990-1991, με ευθύνη της καθηγήτριας Ι. Παπαγιάννη.

Με το πρόγραμμα αυτό, το οποίο αποτελούσε εξειδικευμένο συμπλήρωμα παλαιότερων ερευνών, διερευνήθηκε η ποιότητα του λιγνίτη και οι λοιπές παράμετροι που επιδρούν στα χαρακτηριστικά

της ιπτάμενης τέφρας, όπως οι συνθήκες στο θάλαμο καύσεως, το φορτίο των Μονάδων, η ποιότητα των φίλτρων, η λεπτότητα άλεσης κλπ.

Στη φάση αυτή διαπιστώθηκαν και αποφασίστηκαν τα παρακάτω:

- Θα πρέπει να απορρίπτεται και να μην υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία, τέφρα με περιεκτικότητα σε $\text{SO}_3 > 7\%$.
- Η καταλληλότερη Μονάδα για τη λήψη της ιπτάμενης τέφρας είναι η Νο 4 της Πτολεμαΐδας, ισχύος 300 MW και χρόνου εγκατάστασης το 1973. Οι άλλες τρεις Μονάδες (No1, No2 και No3) είχαν χρόνους εγκατάστασης το 1959, το 1962 και το 1965 και εγκατεστημένη ισχύ 70 MW, 125 MW και 125 MW αντίστοιχα και παρουσίαζαν συνήθως δυσμενή αποτελέσματα ως προς την ποιότητα της αποδιδόμενης τέφρας, παρόλο που και οι τέσσερις Μονάδες τροφοδοτούντο με την ίδια ποιότητα λιγνίτη. Η διαφοροποίηση αυτή ήταν αποτέλεσμα των συνθηκών καύσεως, του φορτίου της Μονάδας και άλλων ειδικών παραμέτρων που αφορούσαν στο σχεδιασμό εκάστης.
- Η λήψη της τέφρας, κυρίως για τον έλεγχο της περιεκτικότητας σε θείο, θα πρέπει να γίνεται τουλάχιστον 6 ώρες μετά την τυχόν διακοπή και επανεκκίνηση της Μονάδας.
- Απαιτείται έλεγχος και στοιχειώδης ομογενοποίηση της αυλής λιγνίτη, διότι η τροφοδοσία των Μονάδων από διαφορετικά πεδία συχνά επηρέαζε την ποιότητα της τέφρας και δη το περιεχόμενο CaO .

Όλοι οι ξένοι Σύμβουλοι επιβεβαίωσαν την ποιότητα και την αρτιότητα των ερευνών και εγγυήθηκαν την επιτυχία του εγχειρήματος.

Στη φάση αυτή ετέθησαν επίσης τα βασικά κριτήρια ποιοτικού ελέγχου, όπως αναλύονται στη συνέχεια (παράγραφος 4.1), καθώς και η όλη φιλοσοφία σχεδιασμού του συγκροτήματος άλεσης, για την επεξεργασία της ακατέργαστης τέφρας.

Η επεξεργασία στοχεύει στη μείωση του ελεύθερου ασβεστίου (CaO_f) σε ποσοστά μικρότερα του 3%, αφού προηγηθεί επιλογή ακατέργαστης τέφρας με διαθέσιμο ασβέστιο στα όρια από 5% έως 13%.

Το συγκρότημα περιλαμβάνει ένα μύλο κλειστού κυκλώματος, με τρία διαδοχικά διαμερίσματα, εξωτερικών διαστάσεων 2,6X12,0 m, δυναμικότητας 16,7 έως 23 t/h.

Ο μύλος πληρούται κατά το 30% του όγκου του με μεταλλικά σφαιρίδια, με επικρατούσα διάσταση τα 40 mm.

Η εισερχόμενη ακατέργαστη τέφρα εμφανίζει συγκράτηση σε κόσκινο των 45μm της τάξεως του 40% έως 45%.

Η τέφρα διαβρέχεται σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία της υδρόλυσης ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$) και να εξατμισθεί η περίσσεια νερού.

Οι απαιτήσεις για την επεξεργασμένη τέφρα συνοψίζονται στα εξής:

- Λεπτότητα άλεσης: συγκράτηση σε κόσκινο των 45μm ποσοστού της τάξεως του 20% έως 30%.
- Ποσοστό περιεχόμενου ελεύθερου νερού $\leq 1\%$.
- Ποσοστό περιεχόμενου ελεύθερου ασβεστίου (CaO_f) $\leq 3\%$.

ΔΙΑΓΩΝΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΥΡΩΣΗ ΣΥΜΒΑΣΗΣ

Το καλοκαίρι του 1992 η ΔΕΗ διενήργησε διεθνή Διαγωνισμό για την κατασκευή του φράγματος, του Σταθμού Παραγωγής, του συγκροτήματος άλεσης τέφρας στην περιοχή του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και των λοιπών συναφών εργασιών.

Συμμετείχαν οκτώ έμπειροι Οίκοι του εξωτερικού σε Κ/ξία με μεγάλες Ελληνικές Εταιρείες. Προϋπόθεση συμμετοχής στο Διαγωνισμό ήταν οι έχοντες την εμπειρία, σε αντίστοιχου όγκου φράγμα σκυροδέματος, να κατέχουν το 51% στην Κ/ξία.

Στον υπόψη Διαγωνισμό μειοδότησε η Κοινοπραξία «ΑΕΓΕΚ / HIDROGRADNJA / ASI – RCC», η οποία ήταν σύμπραξη εταιρειών (ελληνική, βοσνιακή και αμερικανική).

Η σύμβαση υπεγράφη τον Οκτώβριο του 1992.

ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΣΥΜΒΑΣΗΣ

Ποιοτικός έλεγχος τέφρας

Η κατασκευαστική Κοινοπραξία εγκατέστησε στο χώρο του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και σε γειτνίαση με τη θέση εγκατάστασης του συγκροτήματος άλεσης τέφρας, πλήρως εξοπλισμένο Χημείο, στο οποίο εκτελέστηκαν όλοι οι ποιοτικοί έλεγχοι της ακατέργαστης και κατεργασμένης τέφρας. Την ευθύνη λειτουργίας του Χημείου είχαν οι καθηγητές Σταμάτης Τσίμας και Αγγελική Μουτσάτσου.

Ο ποιοτικός έλεγχος του υλικού και η ομογενοποίησή του, προ της εισαγωγής του στο μίγμα σκυροδέματος, περιελάμβανε τέσσερα επί μέρους στάδια:

- Στάδιο 1: Έλεγχος ποιότητας ακατέργαστης τέφρας

Ελέγχονται ανά δίωρο και κατόπιν συνεχούς δειγματοληψίας, τα ποσοστά CaO και SO_3 , προκειμένου να γίνει η αποδοχή της συγκεκριμένης παρτίδας τέφρας.

Η μέτρηση του διατιθέμενου ασβεστίου ($\text{CaO}_{\text{avail}}$) ακολουθεί το πρότυπο EN 451.1, ενώ η μέτρηση του SO_3 επιτυγχάνεται με συσκευή Leco και κυψέλη υπερύθρων (infrared cell - IR).

- Στάδιο 2: Έλεγχος της ικανότητας του μύλου

Ανά δυο ώρες ελέγχεται με συνεχή δειγματοληψία η έξοδος του μύλου και μετράται το διατιθέμενο ασβέστιο ($\text{CaO}_{\text{avail}}$), καθώς και το ελεύθερο (CaO_f), προκειμένου να διαπιστωθεί η δυνατότητα του μύλου να ανταποκριθεί στις προδιαγραφόμενες απαιτήσεις ή στην αντίθετη περίπτωση να γίνει επαύξηση της ποσότητας του εγχυόμενου νερού. Το ελεύθερο ασβέστιο υπολογίζεται έμμεσα, δι' αφαιρέσεως από το συνολικό ασβέστιο της ποσότητας του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, το οποίο προσδιορίζεται με τη θερμοσταθμική μέθοδο (Thermal Gravimetric Analysis – TGA).

- Στάδιο 3: Έλεγχος ποιότητας τελικού προϊόντος

Περιλαμβάνει τρία επί μέρους στάδια:

Στάδιο 3.1 Διενεργείται τελικός δειγματοληπτικός έλεγχος του CaO_i , του SO_3 και της υγρασίας κατά τη φάση φόρτωσης των 25τοννων σιλοφόρων. Εάν κάποιο φορτίο σιλοφόρου δεν ανταποκριθεί στα προδιαγραφέντα όρια, απορρίπτεται συνολικά.

Στάδιο 3.2 Γίνονται φυσικοχημικές δοκιμές της κατεργασμένης τέφρας, αντίστοιχες με του τσιμέντου (πρότυπο EN 196.3). Το εξεταζόμενο δείγμα προκύπτει από ανάμειξη δέκα (10) δειγμάτων από αντίστοιχα σιλοφόρα και αντιπροσωπεύει έλεγχο φορτίου 250 t.

Στάδιο 3.3 Γίνεται χημική ανάλυση, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196.2, σε δείγμα που προκύπτει από ανάμειξη δέκα (10) δειγμάτων του σταδίου 3.2 (ή σε δείγμα 100 σιλοφόρων). Αυτή η ανάλυση αντιπροσωπεύει φορτίο 2500 t.

- Στάδιο 4: Ομογενοποίηση τέφρας στα σιλό Πλατανόβρυσης

Η επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα μεταφέρεται με σιλοφόρα από το συγκρότημα άλεσης της τέφρας στην Πτολεμαΐδα και τοποθετείται σε έξι μεταλλικά σιλό των 500 t έκαστο, τοποθετημένα πλησίον της θέσεως διάστρωσης του φράγματος. Δεδομένου ότι η μέση ημερήσια κατανάλωση δεν υπερβαίνει τους 500 t, τα σιλό αυτά εξασφαλίζουν εβδομαδιαία αποθήκευση 3000 t.

Τα έξι αυτά σιλό πέραν του ότι διαθέτουν αυτόματο μηχανισμό ομογενοποίησης της τέφρας κατά την έξοδό της προς το συγκρότημα παραγωγής του κυλινδρούμενου σκυροδέματος, επιπλέον πληρούνται εναλλάξ, μέσω των σιλοφόρων, ώστε να εξασφαλίζεται περαιτέρω βελτίωση της ομογενοποίησης του υλικού.

Ποιοτικός έλεγχος σκυροδεμάτων φράγματος

Η σύνθεση των σκυροδεμάτων του φράγματος, η παραγωγή τους, η διάστρωσή τους και ο εν γένει απαιτούμενος εξοπλισμός για την κατασκευή του φράγματος απέτέλεσε αντικείμενο λεπτομερών προδιαγραφών, οι οποίες έλαβαν υπόψη και τις μετεωρολογικές συνθήκες στη θέση του έργου και κυρίως τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Σημαντική συμβολή στην επιτυχή ολοκλήρωση του έργου είχε και το ΚΕΝΤΡΟ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΤΗΣ ΔΕΗ (ΚΔΕΠ), στο οποίο εκτελέστηκαν πλήθος συμπληρωματικών δοκιμών σκυροδέματος, κυρίως κατά τη φάση κατασκευής του φράγματος, καθώς και οι έμπειροι χημικοί των εργαστηρίων της ΔΕΗ στους θερμικούς σταθμούς της περιοχής Πτολεμαΐδας, οι οποίοι γνώριζαν τη χημική σύσταση και τη συμπεριφορά των διαφόρων λιγνιτικών κοιτασμάτων.

Η διάστρωση του φράγματος ξεκίνησε στις 18.10.1995 και ολοκληρώθηκε στις 10.03.1997, συμπεριλαμβανομένης και 5μηνιαίας διακοπής, λόγω υψηλών θερινών θερμοκρασιών.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΕΙΣ

Δεν είναι εύκολο να αποτιμηθεί με απλές οικονομικές εκτιμήσεις η επιλογή της ΔΕΗ για την κατασκευή του έργου. Στην παράγραφο 2.1 εδόθησαν σε αδρές γραμμές τα οικονομικοτεχνικά κριτήρια τα οποία επεκράτησαν στη φάση λήψεως των αποφάσεων για την υιοθέτηση των συγκεκριμένων τεχνολογιών.

Εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι εάν δεν είχε επιλεγεί από τη ΔΕΗ η λύση του κυλινδρούμενου σκυροδέματος, σε καμία περίπτωση δεν θα αντιμετωπιζότο ως εναλλακτική λύση κατασκευή φράγματος από συμβατικό σκυρόδεμα.

Όπως προαναφέρθηκε τα φράγματα με συμβατικό σκυρόδεμα είχαν ήδη εγκαταλειφθεί από τη δεκαετία του 1960, ως εξαιρετικά δαπανηρά, χρονοβόρα και με ειδικές απαιτήσεις εξοπλισμού. Αντίθετα το βασικό πλεονέκτημα του κυλινδρούμενου είναι ότι διαστρώνεται απλά και γρήγορα με την τεχνική των χωμάτων φραγμάτων.

Επομένως η εναλλακτική λύση για τη ΔΕΗ θα ήταν οπωσδήποτε η κατασκευή χωμάτινου φράγματος. Στην ίδια περίοδο άλλωστε μελετήθηκε και δημοπρατήθηκε το φράγμα Μεσοχώρας, με ανάντη πλάκα σκυροδέματος.

Η επισήμανση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, προκειμένου να τονιστεί ότι το φράγμα Πλατανόβρυσης, παρά την αυξημένη χρήση τέφρας, αύξησε παράλληλα και τη χρήση του τσιμέντου και δεν έδρασε ανταγωνιστικά προς τις τσιμεντοβιομηχανίες.

Αναφέρονται στη συνέχεια κάποιες χαρακτηριστικές συμβολαιοποιημένες ποσότητες και τιμές, (Δ' τρίμηνο 1992), σκυροδεμάτων, τέφρας, τσιμέντου, για την κατασκευή του φράγματος, απλώς για συγκριτικούς λόγους.

Πίνακας 2. Οικονομικά στοιχεία

ΥΛΙΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	TIMH ΜΟΝΑΔΑΣ (δρχ)	ΣΥΝΟΛΙΚΗ TIMH (δρχ)
Τσιμέντο Πόρτλαντ Ι - 45 (t)	29.000	23.000	667.000.000
Άλεση και διακίνηση ιπτάμενης τέφρας (t)	120.000	6.600	792.000.000
Σκυρόδεμα ισοπεδώσεως (m ³)	7.000	3.800	26.600.000
Σκυρόδεμα κυλινδρούμενο (m ³)	465.000	3.650	1.697.250.000
Σκυρόδεμα στοιχείων όψεως (m)	47.800	4.000	191.200.000

Τα λοιπά σκυροδέματα που απαιτήθηκαν για τις άλλες κατασκευές (υδροληψίες, σταθμός παραγωγής, εκχειλιστής σήραγγα, εκκενωτής πυθμένα κλπ.) ανέρχονται σε 205.000 m³, με μέση τιμή 10.000δρχ/ m³. Για την ποσότητα αυτή χρησιμοποιήθηκαν 68.000 (t) Τσιμέντου Πόρτλαντ ΙΙ, με τιμή 14.500δρχ/ t και συνολική τιμή 986.000.000 δρχ.

Επειδή όμως δεν είναι δυνατόν να αποτιμηθούν τα πάντα λογιστικά, κατά την άποψή μας το τολμηρό αυτό εγχείρημα έπρεπε να εξυπηρετήσει δύο βασικούς στόχους της Πολιτείας:

- Την ταχεία κατασκευή φραγμάτων από σκυρόδεμα, με στόχο, πέραν της ενεργειακής αξιοποίησης, τη λειτουργία των έργων αυτών ως έργων πολλαπλής σκοπιμότητας, με ποικίλες δυνατότητες αναβάθμισης της ελληνικής υπαίθρου και αξιοποίησης ανθρώπινου δυναμικού.

Πέραν της κατασκευής φραγμάτων η τεχνολογία του κυλινδρούμενου σκυροδέματος δίδει λύσεις ταχείας και οικονομικής και σε άλλης φύσεως κατασκευές (οδοποιία και ανθεκτικά

οδοστρώματα, αντιστηρίξεις, δάπεδα ειδικών απαιτήσεων, λιμενικά έργα κλπ.), πρακτικές που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία διεθνώς.

- Την εισαγωγή της τέφρας ως παραπροϊόντος σε διάφορες χρήσεις και κατασκευές και μάλιστα πολύ πιο απλούστερες από την κατασκευή ενός υψηλού φράγματος.

Με την εισαγωγή της συγκεκριμένης τεχνολογίας επιβεβαιώθηκε ότι η τέφρα Πτολεμαΐδας είναι εξαιρετική υδραυλική κονία, με δυνατότητες εύκολης προσαρμογής στις απαιτήσεις και στις ιδιότητες του σκυροδέματος και των κατασκευών για τις οποίες προορίζεται.

Γιατί λοιπόν κανείς από τους στόχους αυτούς δεν έχει μέχρι σήμερα επιτευχθεί;

Οι απαντήσεις δεν είναι μονοσήμαντες, αλλά θα καταβληθεί προσπάθεια να είναι αντικειμενικές.

- Το φράγμα της Πλατανόβρυσης ήρθε να επισφραγίσει την επάρκεια και την ικανότητα μιας κραταιής και πρωτοποριακής διεύθυνσης της ΔΕΗ, της Δ/σης Ανάπτυξης ΥΗΕ, η οποία από το 1975 έως και το 1995 εγκατέστησε 1600 MW μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, έχοντας την αποκλειστική ευθύνη των μελετών και της επίβλεψης. Η προηγούμενη εικοσαετία (1955-1975) έδωσε 1400 MW μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, την ευθύνη των οποίων από τη φάση της μελέτης έως και την υλοποίηση είχαν αναλάβει μεγάλοι Οίκοι του εξωτερικού.

Στη συνέχεια ακολούθησαν δύσκολες περίοδοι. Είναι χαρακτηριστικό ότι το έργο του Τεμένους δημοπρατήθηκε το 1997 και δεν κατακυρώθηκε ποτέ, ενώ ο επόμενος Διαγωνισμός που έγινε για κατασκευή φράγματος από τη ΔΕΗ είναι πρόσφατος, το 2003 και αφορά το φράγμα του Ιλαρίωνα στην Κοζάνη.

Μία πρώτη ερμηνεία είναι η ανάγκη εισόδου του φυσικού αερίου στη χώρα και οι διακρατικές δεσμεύσεις οι οποίες αναλήφθηκαν. Με την υποχρέωση της ΔΕΗ να περιλάβει το φυσικό αέριο στην ηλεκτροπαραγωγή, ανεστάλη αντίστοιχα το Πρόγραμμα Ανάπτυξης ΥΗΕ.

- Οι άλλοι δημόσιοι φορείς (ΥΠΕΧΩΔΕ, ΥΠ. ΓΕΩΡΓΙΑΣ), καθώς οι λοιποί φορείς που ανέλαβαν μεγάλες κατασκευές στη χώρα, δεν περιέλαβαν αντίστοιχη τεχνολογία σε έργα της δικής τους ευθύνης, δεδομένης της έλλειψης προδιαγραφών για τη χρήση τέφρας τόσο στο σκυρόδεμα όσο και σε άλλες εφαρμογές και δη οδοποιία και δομικά υλικά.
- Η ίδια η ΔΕΗ δεν έδειξε το αντίστοιχο ενδιαφέρον για την περαιτέρω αξιοποίηση του συγκροτήματος άλεσης τέφρας και της τέφρας εν γένει. Το 1998 δημοσιεύθηκε Πρόσκληση για ανάληψη από ιδιώτες της λειτουργίας του συγκροτήματος, με παράλληλη σύνταξη προδιαγραφών και μελέτης αξιοποίησης, η οποία όμως δεν είχε συνέχεια, παρά το αρχικό ενδιαφέρον που εξεδηλώθη τόσο από τις τσιμεντοβιομηχανίες όσο και από κατασκευαστικές εταιρείες.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Η κατασκευή του φράγματος Πλατανόβρυσης αποτελεί από παράδειγμα αξιοποίησης παραπροϊόντος και μάλιστα σε εξειδικευμένη χρήση.

Δυστυχώς, μέχρι σήμερα, δεν ελήφθησαν υπόψη από τη ΔΕΗ και την Πολιτεία εν γένει τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη και οι πόροι οι οποίοι μπορεί να εξοικονομηθούν από την τυποποίηση και την εισαγωγή των τεφρών σε διάφορες παραγωγικές χρήσεις. Οι ευρωπαϊκές χώρες (Γαλλία, Ιταλία, Γερμανία), καθώς και οι ΗΠΑ και ο Καναδάς έχουν ολοκληρώσει ευρύτατα προγράμματα εμπορικής αξιοποίησης των τεφρών και έχουν δημιουργήσει ανθούσες βιομηχανίες.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ ΜΗ ΣΥΜΜΟΡΦΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ

Σ.Κ. Αντίοχος και Σ. Τσίμας

Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Μολονότι τα πλεονεκτήματα των Ελληνικών ιπταμένων τεφρών είναι πλέον καλά διαπιστωμένα σε εργαστηριακό και βιομηχανικό επίπεδο, ο ετήσιος ρυθμός αξιοποίησης αυτών παραμένει σταθερά χαμηλός στο 10-12%. Το πρόσφατα συνταχθέν Εθνικό σχέδιο προδιαγραφών για την χρήση της ασβεστούχου τέφρας αναμένεται να αυξήσει τον συνολικό ρυθμό εκμετάλλευσης της. Από την εφαρμογή ωστόσο στην πράξη του ίδιου σχεδίου αναμένεται να προκύψει μια νέα κατηγορία τεφρών, οι απορριπτέες (reject – rFA), αυτές δηλαδή που δεν θα συμμορφώνονται με τις προαναφερθείσες προδιαγραφές. Στην εργασία προτείνονται δύο νέοι τρόποι αξιοποίησης απορριπτέων τεφρών μέσω της παραγωγής σύνθετων τσιμέντων από (i) υποκατάσταση της ορυκτής γύψου με τέφρα υψηλών θεικών και (ii) χρήση του αναβαθμισμένου χονδρόκοκκου κλάσματος αυτών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται ενισχύουν την πεποίθηση πως η κατάλληλη χρήση μη-προτυποποιημένων υλικών μπορεί να οδηγήσει σε νέα ποιοτικά, φιλικά προς το περιβάλλον προϊόντα.

Λέξεις κλειδιά: απορριπτέα τέφρα, διαχωρισμός, σύνθετα τσιμέντα, ενεργό πυρίτιο

ALTERNATIVE METHODS OF UPGRADING AND UTILIZING GREEK FLY ASHES NON CONFORMED TO THE NATIONAL SPECIFICATIONS

S.K. Antiohos and S. Tsimas

School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens

ABSTRACT: Despite the fact that the advantages of Hellenic fly ashes are fairly well established, their annual utilization rate remains low at approximately 10-12%. The recently composed National specifications on the use of high-calcium fly ash in (non-reinforced for the time being) concrete is expected to increase the utilization rate of fly ash. On the other hand it is also expected to introduce a new category of fly ashes, the reject ones (rFA), involving the materials that are non conformed to these specifications. In the study presented herein, two novel methods of absorbing reject fly ashes into the cement industry are introduced by investigating into new types of blended cements prepared (i) by replacing gypsum with a high-sulfur high-calcium fly ash and (ii) by upgrading and utilizing the coarse part of a different fly ash. The evaluation of the results consolidates the belief that appropriate usage of non-standardized materials may lead to new environmental-friendly products of good quality.

Keywords: reject fly ash, fractionation, processing, blended cement, reactive silica

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ιπτάμενες τέφρες που παράγονται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κατά κόρον ως πρόσθετα σε σύνθετα τσιμέντα και ως απ' ευθείας ενεργές προσθήκες στο σκυρόδεμα είτε στο έτοιμο (ready-mixed), είτε στο υψηλής αντοχής (HPC) είτε και στο αυτόσυμπκνυμενο (self-consolidating) [1-3]. Η καταλληλότητα τους για τους άνωθεν σκοπούς, καθορίζεται από την συμμόρφωση τους με βασικά κριτήρια όπως η απώλεια πύρωσης, το ενεργό πυρίτιο και αλούμινα, η λεπτότητα, το περιεχόμενο ποσοστό θεικών κ.α.. Ανάλογα με το επίπεδο συμμόρφωσης τους και σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες τους, οι ιπτάμενες τέφρες είτε εντάσσονται στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 450-1, είτε σε Εθνικές προδιαγραφές. Η πιθανότητα βέβαια του να διαμορφωθεί η μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με σκοπό την ανάκτηση ποιοτικότερης τέφρας δεν είναι ρεαλιστική, ιδιαίτερα για τον Ελλαδικό χώρο όπου η παραγωγός εταιρία διατηρεί – μέχρι τώρα - ουδέτερη στάση αναφορικά με την διαχείριση του πολύτιμου αυτού παραπροϊόντος. Συνεπώς, κάθε χώρα, που παράγει τέφρες των οποίων η ποιότητα δεν καλύπτεται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο, προχωρά σε διαμόρφωση Εθνικού σχεδίου προδιαγραφών που ενσωματώνει τις ιδιαιτερότητες του τοπικού προϊόντος.

Γενικά, ο ρυθμός αξιοποίησης της ιπτάμενης τέφρας καθορίζεται από: (i) την ετήσια παραγωγή του, (ii) το ποσοστό αυτής που μπορεί να απορροφηθεί στην εγχώρια βιομηχανία τσιμέντου και σκυροδέματος και (iii) την διαφοροποίηση της (αναφορικά με την φυσικοχημική της σύσταση) σε σχέση με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Γίνεται επομένως κατανοητό πως χώρες όπως η Γερμανία και η Ολλανδία εμφανίζουν εντυπωσιακούς ρυθμούς αξιοποίησης (περί το 100%), ενώ σε άλλες (ανάμεσα τους και η Ελλάδα) ο αντίστοιχος αριθμός είναι σταθερά περιορισμένος. Αναμφισβήτητα, η σημαντικότερη προσπάθεια που έχει γίνει στην χώρα μας προς αύξηση του ρυθμού αυτού είναι η πρόσφατη σύνταξη του Εθνικού σχεδίου προδιαγραφών που αφορά στην χρήση της τέφρας υψηλού ασβεστίου στην παραγωγή – άοπλου προς το παρόν – σκυροδέματος. Είναι φανερό πως οι προδιαγραφές αυτές μπορούν να λειτουργήσουν υπέρ της αυξημένης χρήσης του Ελληνικού προϊόντος. Παράλληλα ωστόσο αναμένεται να εισάγουν μια νέα κατηγορία τεφρών, τις απορριπτές (reject ή απλούστερα rFA), οι οποίες θα είναι αυτές που δεν θα συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου σχεδίου. Με δεδομένη την μέχρι τώρα εμπειρία των συγγραφέων [4-5], το ποσοστό της συνολικής παραγωγής που θα χαρακτηριστεί ως απορριπτέο αναμένεται ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένης της ανομοιογένειας και ιδιαίτερης φυσικοχημικής σύστασης της Ελληνικής τέφρας. Η κάθε χρόνο αύξηση της αξιοποίησης της τέφρας είναι μεγάλης σημασίας στόχος, συνεπώς επιβάλλεται να ερευνηθούν όλοι οι πιθανοί τρόποι που μπορούν να τον ικανοποιήσουν.

Στην εργασία αυτή εξετάζονται νέοι τρόποι απορρόφησης δύο ειδών απορριπτών Ελληνικών ιπταμένων τεφρών υψηλού ασβεστίου. Συγκεκριμένα αντιμετωπίζεται το ζήτημα αξιοποίησης σε σύνθετα τσιμέντα (α) μιας ασβεστούχας τέφρας με υψηλό ποσοστό θεικών και (β) του χονδρόκοκκου κλάσματος μιας τέφρας με επίσης υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο. Κίνητρο για την πρώτη περίπτωση αποτέλεσε για τους συγγραφείς το γεγονός πως τα SO_4^{2-} ιόντα της τέφρας μπορούν πολύ εύκολα να διαλυτοποιηθούν στο πορώδες διάλυμα και να λειτουργήσουν υπέρ της καθυστέρησης της πήξης (αντικαθιστώντας ουσιαστικά την ορυκτή γύψο). Ανάλογα, στην δεύτερη περίπτωση, δεδομένου του εμπλουτισμού του χονδρόκοκκου κλάσματος σε ενεργό πυρίτιο [6], πιστεύεται πως αν το εν λόγω κλάσμα αρχικά συγκεντρωθεί (με την βοήθεια ενός αεροδιαχωριστήρα) και εν συνεχεία αλεστεί (για να μην απολεσθεί το filler effect της τέφρας) μπορεί να αποτελέσει ένα νέο υλικό αυξημένης ποζολανικότητας και πιθανότατα καλύτερης απόδοσης σε σύνθετα συστήματα τσιμέντου. Επιτυχία των παραπάνω σχημάτων μπορεί να αποτελέσει την βάση για την περαιτέρω αξιοποίηση συγκεκριμένων ποιοτήτων ιπτάμενης τέφρας που προς το παρόν λογίζονται ως απορριπτόμενες.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Πρώτες ύλες

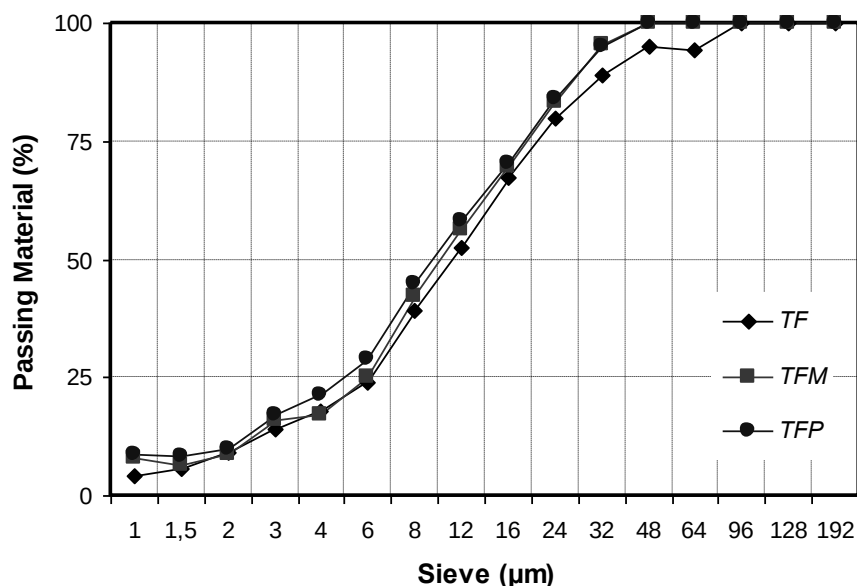
Η χημική ανάλυση και οι κύριες φυσικοχημικές ιδιότητες του κλίνκερ (C) και των δύο τεφρών (ως T_{HS} αναφέρεται η τέφρα υψηλών θεικών, ενώ η τέφρα της οποίας τα κλάσματα διαχωρίστηκαν συμβολίζεται ως T_F) που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Σημειώνεται πως ο προσδιορισμός των δραστικών οξειδίων του πυριτίου και ασβεστίου και του αδιάλυτου υπολείμματος έγινε με βάση το EN 450-1, της υαλώδους φάσης με τις προτάσεις της RILEM (TC FAB-67 - Use of Fly Ash in Building), ενώ ως γ_s ορίζεται το δραστικό κλάσμα πυριτίου, όπως αυτός προκύπτει από τον λόγο του ενεργού προς το συνολικό πυρίτιο της ποζολάνης. Το ειδικό βάρος όλων των δειγμάτων μετρήθηκε κατά ASTM C-188.

Πίνακας 1. Χημική ανάλυση και φυσικά χαρακτηριστικά πρώτων υλών

	C	T_{HS}	T_F	T_{FP}	T_{FM}
CaO	65.01	35.22	29.79	21.02	33.02
CaO _f	0.63	7.59	4.05	2.36	4.45
CaO _{re}		29.13	25.13	16.35	27.43
SiO ₂	20.28	33.43	36.92	42.79	33.50
SiO _{2re}	-	23.96	29.13	32.46	26.49
Al ₂ O ₃	4.75	12.56	13.50	14.92	11.80
Fe ₂ O ₃	3.76	5.96	7.06	5.82	5.70
MgO	1.61	3.31	2.69	3.32	3.43
SO ₃	2.55	6.57	5.10	3.09	8.79
R ₂ O	0.52	1.15	1.42	1.30	1.32
LOI	2.31	3.36	4.36	4.66	4.01
γ_s	-	71.67	78.90	75.86	79.07
Αδιάλυτο Υπόλειμμα (%)	0.18	14.66	14.52	15.69	10.40
Υαλώδης Φάση (%)	-	85.34	85.48	84.31	89.60
Blaine Ειδική Επιφάνεια (cm ² /g)	3.800	5.230	5.450	5.420	5.250
Ειδικό Βάρος	3.13	2.83	2.80	2.92	2.78

Προς συλλογή του χονδρόκοκκου κλάσματος της T_F , η αρχική τέφρα διαχωρίστηκε με την βοήθεια ενιαίου συστήματος αεροδιαχωριστή (air-classifier) - κόσκινου των 45 μ m – κυκλώνα σε δύο νέες τέφρες: την χονδρόκοκκη (T_{FP}) που αποτέλεσε περίπου το 58% της αρχικής και την λεπτότερη (T_{FM}) με διάμετρο των σωματιδίων μικρότερο των 45 μ m. Τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών τεφρών δίνονται επίσης στον Πίνακα 1. Προς εξουδετέρωση του παράγοντα της λεπτότητας από την συνδρομή των τεφρών στις μηχανικές αντοχές των σύνθετων τσιμεντών, τόσο η αρχική όσο και οι διαχωρισμένες τέφρες αλέστηκαν σε εργαστηριακό μύλο με σκοπό την επίτευξη παρόμοιας κοκκομετρικής κατανομής. Τα δεδομένα που εμφανίζονται στην Εικόνα 1 (βασισμένα στην

κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων με την συσκευή SILAS) καθώς και οι παρόμοιες τιμές της ειδικής επιφάνειας Blaine πιστοποιούν την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας που ακολουθήθηκε. Σχολιασμός των ιδιοτήτων των κλασμάτων σε σχέση με το μητρικό υλικό ακολουθεί στην ενότητα των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 1. Κοκκομετρική κατανομή της αρχικής τέφρας T_F και των κλασμάτων της μετά από άλεση

Αναλυτικές δοκιμές

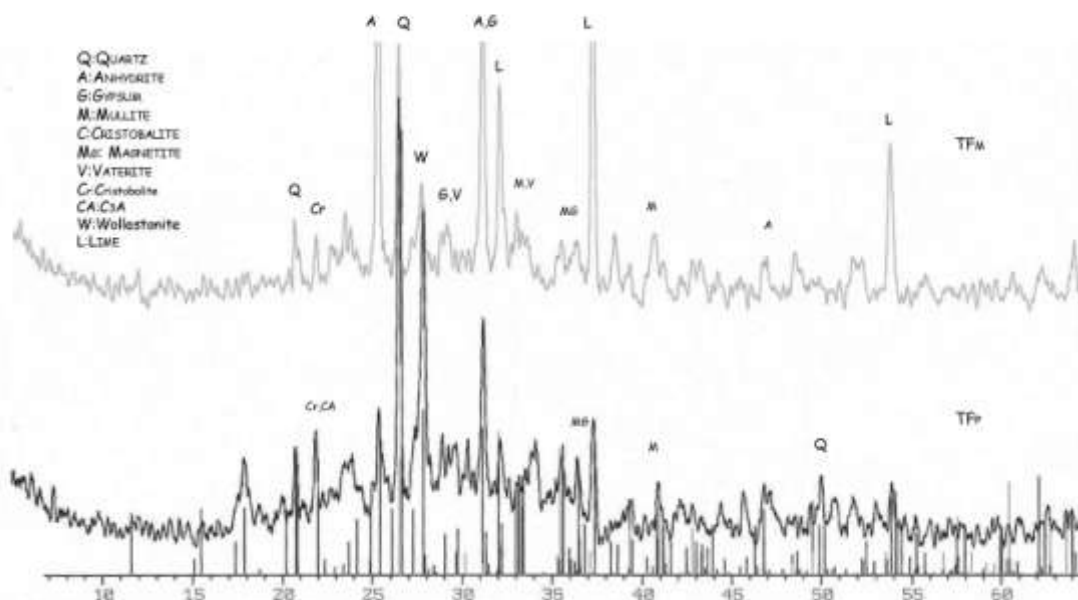
Δεδομένης της επιρροής της προσθήκης ιπτάμενης τέφρας στην διαδικασία πήξης του τσιμέντου και της επιχειρούμενης αξιολόγησης της δυνατότητας της να λειτουργήσει ως ρυθμιστής της πήξης, κατασκευάστηκαν δοκίμια με κλίνκερ και τέφρα T_{HS} (απουσία γύψου) που έφτασε και το 50% (κατά βάρος κλίνκερ) και δοκιμάστηκαν με την συσκευή Vicat προς εύρεση των αρχικών και τελικών χρόνων πήξης. Σύγκριση έγινε με δοκίμιο αναφοράς που προετοιμάστηκε από συνάλεση του ίδιου κλίνκερ με 5% ορυκτή γύψο μέχρις παρόμοιας ειδικής επιφάνειας με τα ποζολανικά δείγματα.

Η μηχανική συμπεριφορά των νέων τσιμέντων – αυτών με την τέφρα υψηλών θεικών και αυτών με τα διαχωρισμένα κλάσματα - μελετήθηκε δια της κατασκευής κονιαμάτων (επιλέχθηκαν λόγοι υλικών/άμμο 1:3 και W/C_M 0.5 και ακολουθήθηκαν διαδικασίες που έχουν περιγραφεί αναλυτικά σε προηγούμενες εργασίες [4,7]). Στην πρώτη περίπτωση 20% και 30% αντικατάσταση τσιμέντου από τέφρα έλαβε χώρα, ενώ στην δεύτερη έως και 40% αντίστοιχα. Προς βελτίωση των αντοχών των ποζολανικών δειγμάτων με την χαμηλού ποζολανικού δυναμικού (όπως αυτό καθορίζεται από το ενεργό της πυρίτιο) T_{HS} , μία νέα μέθοδος ενεργοποίησης εφαρμόστηκε στοχεύοντας στην επιτάχυνση της συνήθως αργής ποζολανικής δράσης. Σύμφωνα με αυτή, 5% Na_2SO_4 προστέθηκε στο μίγμα και τα δοκίμια κατεργάστηκαν υδροθερμικά στους 40°C για 18 ώρες. Παρασκευάστηκε επίσης δοκίμιο αναφοράς μόνο με τσιμέντο (control) για συγκριτικούς λόγους. Οι αντοχές όλων των δοκιμών μετρήθηκαν στις 2, 7, 28 και 90 ημέρες μετά την μίξη και οι τιμές τους χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστούν οι αντίστοιχοι συντελεστές αποδοτικότητας (k -values). Παράλληλα εξετάστηκε η εφαρμογή προσεγγιστικής σχέσης, που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη εργασία [4], η οποία συνδέει το περιεχόμενο ενεργό πυριτικό κλάσμα της ποζολάνης και τους συντελεστές αποδοτικότητας σε βάθος χρόνου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Χαρακτηρισμός των επιμέρους κοκκομετρικών κλασμάτων

Παρά το γεγονός πως η επιρροή της διαδικασίας διαχωρισμού στην σύσταση της τέφρας έχει αμφισβητηθεί από διάφορους ερευνητές [8], η μελέτη των δεδομένων του Πίνακα 1 πιστοποιεί πως τα ανακτηθέντα κλάσματα διαφοροποιούνται σημαντικά τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με την αρχική τέφρα από την οποία προήλθαν. Η διαφοροποίηση αυτή είναι ιδιαίτερης σημασίας δεδομένου πως η φυσικοχημική σύσταση της τέφρας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το ποζολανικό της δυναμικό. Το χονδρόκοκκο κλάσμα για παράδειγμα (T_{FP}) είναι σαφέστατα εμπλουτισμένο σε συνολικό και ενεργό πυρίτιο σε σχέση με την μητρική τέφρα, ενώ η ελευθέρα άσβεστος και το ποσοστό των θεικών που περιέχει προσεγγίζουν τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 450-1. Αντίθετα, το λεπτότερο κλάσμα (T_{FM}) περιέχει σαφώς περισσότερο CaO (αφού αυτό είναι κατά κανόνα συγκεντρωμένο στα λεπτότερα σωματίδια), αλλά και ασυνήθιστα υψηλές τιμές ελεύθερου- CaO και SO_3 . Αναφορικά με τις δύο τελευταίες παραμέτρους, σημειώνεται πως η χρήση του αλεσμένου χονδρόκοκκου κλάσματος φαντάζει πλεονεκτικότερη αφού αμφότερες απειλούν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Οι τιμές της απώλειας πύρωσης των διαχωρισμένων κλασμάτων δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτή της αρχικής τέφρας, ενώ παρόμοια βρέθηκαν και τα ποσοστά της υαλώδους φάσης. Η σημαντική αύξηση που παρατηρείται στο ειδικό βάρος του χονδρού κλάσματος πιθανότατα οφείλεται στην διαδικασία παρατεταμένης άλεσης η οποία οδήγησε στο σπάσιμο των κενοσφαιριδίων και πλεροσφαιριδίων της τέφρας. Η ορυκτολογική εξέταση με περίθλαση ακτίνων X που απεικονίζεται στην Εικόνα 2 (Siemens D 5000 X-ray diffractometer, CuK_α radiation, 40KV, 30mA in a scanning range of 5 to 65° in 2θ scale and testing rate of $0.02^\circ/sec$) αποκάλυψε στην περίπτωση του χονδρού T_{FP} κλάσματος την παρουσία περισσότερων πυριτικών φάσεων, όπως ο χαλαζίας, ο μουλίτης και ο χρυστοβαλλίτης, ενώ η άσβεστος ανιχνεύθηκε με δυσκολία εν αντιθέσει με ότι συνέβη στο λεπτό κλάσμα T_{FM} όπου η παρουσία φάσεων με CaO είναι εμφανική (ανυδρίτης, C_3A , κτλ.).



Εικόνα 2. XRD γραφήματα των κοκκομετρικών κλασμάτων της T_F

Δοκιμή πήξης

Τα αποτελέσματα της δοκιμής πήξης συνοψίζονται στον Πίνακα 2 μαζί με δεδομένα που αφορούν την απαίτηση σε νερό και την συνολική συγκέντρωση σε SO_3 των μιγμάτων. Όπως αναμενόταν, η εισαγωγή των λεπτά αλεσμένων σωματιδίων της τέφρας στο μίγμα, αύξησε την απαίτηση σε νερό (WD, water demand) αυτού μέχρι και 30% (για 40 και 50% προσθήκης). Αναφορικά με τους χρόνους πήξης, παρατηρείται πως το μίγμα με 20% T_{HS} (και καθόλου ορυκτή γύψο) παρουσίασε σχεδόν ταυτόσημους αρχικούς και τελικούς χρόνους με το δείγμα αναφοράς, δεικνύοντας πως ανάλογη προσθήκη μπορεί να αντισταθμίσει ουσιαστικά την απουσία της γύψου από το μίγμα. Όσο η παρουσία της T_{HS} αυξάνεται στο μίγμα, οι χρόνοι πήξης επιμηκύνονται. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση της μέγιστης προσθήκης τέφρας (40 και 50% εις βάρος κλίνκερ) η πήξη ξεκίνησε με λιγότερο από 60 λεπτά καθυστέρηση, γεγονός που υποδηλώνει πως ικανοποιητικές πρώιμες αντοχές μπορούν να επιτευχθούν ακόμα και σε περιπτώσεις σημαντικής αντικατάστασης κλίνκερ.

Πίνακας 2 Αρχικός (IST) και τελικός (FST) χρόνος πήξης σύνθετων τσιμέντων				
Σύνθεση Μίγματος	SO_3 (%)	WD (mL)	IST (min)	FST (min)
Control		114	105	130
80%C+20% T_{HS}	2,32	131	105	140
70%C+30% T_{HS}	2,85	137	135	155
60%C+40% T_{HS}	3,38	148	155	180
50%C+50% T_{HS}	3,92	148	155	205

Μηχανική συμπεριφορά

- Δοκίμια με τέφρα υψηλών θεικών T_{HS}

Οι θλιπτικές αντοχές των νέων σύνθετων τσιμέντων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 συναρτήσει του χρόνου ενυδάτωσης. Διαπιστώνεται πως τα δοκίμια που ενσωματώνουν την T_{HS} αναπτύσσουν αντοχή σχετικά αργά κατά την πρώτη εβδομάδα και ταχύτερα μετέπειτα ως αποτέλεσμα της εκκίνησης των ποζολανικών αντιδράσεων. Κατά την εξέλιξη της ενυδάτωσης, όλα τα ποζολανικά τσιμέντα χωρίς γύψο αναπτύσσουν αντοχή γρηγορότερα από το δείγμα αναφοράς αγγίζοντας την επίδοση του δείγματος αναφοράς μετά από 90 ημέρες ενυδάτωσης. Γενικά και παρά την απουσία γύψου από το μίγμα παρατηρείται πως τα νέα σύνθετα τσιμέντα εμφανίζουν ανταγωνιστικές μετέπειτα και σχετικά χαμηλές πρώιμες θλιπτικές αντοχές. Για να ξεπεραστεί το τελευταίο μειονέκτημα η χημικό-θερμική ενεργοποίηση που αναπτύχθηκε προηγούμενα εφαρμόστηκε στην περίπτωση του μίγματος με 30% T_{HS} . Οι αντοχές που προέκυψαν παρουσιάζονται επίσης στον Πίνακα 3, όπου γίνεται φανερή η θετική επίδραση της εφαρμοζόμενης μεθόδου. Εκτιμάται πως σε ένα αρχικό στάδιο, η υδροθερμική κατεργασία αυξάνει τους ρυθμούς διαλυτοποίησης της τέφρας και επιταχύνει τον ρυθμό αντίδρασης των ενεργών της συστατικών, ενώ μετέπειτα η παρουσία Na_2SO_4 (μέσω της αύξησης της αλκαλικότητας του πορώδους διαλύματος) ενισχύει τις ποζολανικές δράσεις προς αύξηση της δημιουργίας δευτερεύοντος C-S-H στο σύστημα.

- Δοκίμια με διαχωρισμένα κλάσματα τέφρας T_F

Τα αποτελέσματα των αντοχών της T_F και των κλασμάτων της δίνονται επίσης στον Πίνακα 3. Γίνεται φανερό πως κατά την διάρκεια της πρώτης εβδομάδας, τα δοκίμια της αρχικής τέφρας T_F αναπτύσσουν αντοχή πιο αργά από το δοκίμιο αναφοράς. Ωστόσο το κονίαμα με το αλεσμένο χονδρόκοκκο κλάσμα της (T_{FP}) αποδίδει εξαιρετικά το ίδιο διάστημα ξεπερνώντας μάλιστα το δοκίμιο χωρίς τέφρα μετά από μόλις 2 ημέρες. Αντίθετα το δοκίμιο με το λεπτόκοκκο κλάσμα αποδίδει χειρότερα από την αρχική τέφρα στο ίδιο διάστημα. Δεδομένου πως οι εξεταζόμενες

τέφρες έχουν παρόμοια λεπτότητα, η ανωτερότητα του χονδρού κλάσματος πρέπει να αποδοθεί στην χημική της σύσταση και ιδιαίτερα το πλεόνασμα της σε ενεργό πυρίτιο και αλούμινα που ως γνωστόν είναι οι κύριοι φορείς της ποζολανικής δράσης. Με την εξέλιξη της ενυδάτωσης, η τέφρα T_{FP} συνεχίζει να έχει καλύτερη μηχανική συμπεριφορά με τιμές που αγγίζουν τα 63 MPa στους 3 μήνες. Το κέρδος σε θλιπτική αντοχή του εν λόγω δείγματος αυξάνεται με την συντήρηση και ιδιαίτερα μετά τον πρώτο μήνα, περίοδος που το ενεργό πυρίτιο κατέχει κυρίαρχο ρόλο [7]. Με την αύξηση της παρουσίας τέφρας (40%) οι θλιπτικές αντοχές των δειγμάτων λογικά μειώνονται. Η μείωση αυτή είναι εμφανής στην περίπτωση της μητρικής τέφρας και του λεπτού κλάσματος της, ενώ στην περίπτωση των δοκιμών με T_{FP} οι αναπτυσσόμενες αντοχές είναι ανταγωνιστικές του δοκιμίου αναφοράς, κυρίως μετά τις πρώτες 28 ημέρες, ως αποτέλεσμα της πλήρους κινητοποίησης των ποζολανικών δράσεων με το πέρασμα του χρόνου.

Πίνακας 3: Εξέλιξη θλιπτικής αντοχής κονιαμάτων

	Θλιπτική Αντοχή (MPa)			
	Ηλικία (ημέρες)			
	2	7	28	90
Control	24.7	39.2	50.6	59.7
20 T_{HS}	18.8	30.9	48.3	59.3
30 T_{HS}	20.2	30.6	47.5	60.2
30 $T_{HS} - ac^a$	29.2	35.3	49.1	-
20 T_F	19.4	38.0	49.4	59.7
20 T_{FM}	14.0	28.0	46.6	58.0
20 T_{FP}	25.8	38.3	51.7	62.7
40 T_F	12.8	26.8	42.8	57.3
40 T_{FM}	10.6	16.9	39.2	55.6
40 T_{FP}	22.1	33.3	49.0	60.3

ac^a ; χημικό-θερμικά ενεργοποιημένο δοκίμιο

Συντελεστές αποδοτικότητας

Έχει επανειλημμένως δειχθεί [4,6,7] πως στην περίπτωση κονιαμάτων ή σκυροδέματος που ενσωματώνουν δευτερεύοντα υδραυλικά υλικά ο συντελεστής αποδοτικότητας (k-value) δίνεται από την σχέση:

$$f_c = K \left(\frac{1}{W/(C + kP)} - a \right) \quad (1)$$

όπου f_c η θλιπτική αντοχή (MPa) του σκυροδέματος, W είναι η περιεκτικότητα σε νερό του αρχικού μίγματος σκυροδέματος (kg/m^3), C η περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m^3), P είναι η ποζολάνη που εισήχθη στο σκυρόδεμα (kg/m^3), K μία παράμετρος που εξαρτάται από τον τύπο τσιμέντου (στην παρούσα εργασία ίση με 38.8 MPa) και a μία παράμετρος που εξαρτάται κυρίως από τον χρόνο και συνθήκες συντήρησης. Χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση και τις τιμές των θλιπτικών αντοχών (Πίνακας 3), υπολογίστηκαν και παρουσιάζονται στον πίνακα 4, οι συντελεστές ενεργότητας για αντιπροσωπευτικά δοκίμια. Τα δεδομένα του Πίνακα 4 δεικνύουν την μέτρια δραστηκότητα της χαμηλού ενεργού πυριτίου T_{HS} . Το γεγονός πως ακόμα και μετά από 3 μήνες συντήρησης ο συντελεστής k για το τσιμέντο με 20% T_{HS} παραμένει κάτω της μονάδας δεικνύει πως η εν λόγω τέφρα δεν μπορεί να αντισταθμίζει την απώλεια των συστατικών του κλίνκερ. Αντίθετα τα δεδομένα για τις τέφρες T_F και T_{FP} πιστοποιούν την ανικανότητα της μητρικής τέφρας να δράσει άμεσα προς ανάπτυξη αντοχής ανάλογης αυτής του δοκιμίου

αναφοράς, αλλά και την μεγάλη δραστικότητα του χονδρόκοκκου κλάσματος η οποία κορυφώνεται με το πέρασμα του χρόνου συντήρησης αγγίζοντας τιμές υψηλότερες και από αυτές άλλων θεωρητικά πιο δραστικών από την τέφρα ποζολανών (μετακαολίνης, τέφρα φλοιού ρυζιού, κτλ).

Πίνακας 4: Ενδεικτικά k-values για διάφορα σύνθετα κονιάματα

	k-values			
	Ηλικία (ημέρες)			
	2	7	28	90
$20 T_{HS}$	0.46	0.30	0.51	0.88
$20 T_{HS} - \theta^a$				0.88
$20 T_F$	0.66	0.92	0.92	1.00
$20 T_{FP}$	1.07	0.94	1.07	1.19
$20 T_{FP} - \theta^a$			1.05	1.23

θ^a ; με χρήση προσεγγιστικής σχέσης

Σε πρόσφατη εργασία [4], αναπτύχθηκε για πρώτη φορά αναλυτική θεωρητική σχέση που συνδέει το ενεργό πυρίτιο τεχνητών ποζολανών με τον συντελεστή k των συστημάτων που τις ενσωματώνουν, με σκοπό μια πρώτη προσέγγιση της απόδοσης αυτών γνωρίζοντας μόνο την περιεκτικότητα της χρησιμοποιούμενης ποζολάνης σε άμορφο πυρίτιο. Οι συγγραφείς κατέληξαν πως για ένα σύνθετο σύστημα τσιμέντου με ενεργή προσθήκη, ο συντελεστής k δίνεται από τον τύπο:

$$k = (\gamma_S \cdot f_{S,P} / f_{S,C}) (1 - a W/C) \quad (2)$$

όπου : γ_S είναι το δραστικό πυριτικό κλάσμα της ποζολάνης (δίνεται στον Πίνακα 1), and $f_{S,P}$ and $f_{S,C}$ είναι τα κλάσματα του πυριτίου στον καταλύτη και στο τσιμέντο αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας την εξίσωση (2) για την περίπτωση των τσιμέντων με 20% T_{HS} και T_{FP} (ποσοστό αντικατάστασης επαρκές για εκδήλωση ποζολανικής δράσης αλλά ταυτόχρονα όχι μεγάλο σε βαθμό να επηρεάσει δραστικά τον ρυθμό αντίδρασης των στοιχείων του τσιμέντου) και για διάστημα μετά των πρώτων 28 ημερών (διάστημα που το ενεργό πυρίτιο κατέχει κυρίαρχο ρόλο στο σύστημα), θεωρητικές τιμές σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές υπολογίστηκαν. Η παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώνει ακόμη μια φορά την πιστότητα και την αναβαθμισμένη δυνατότητα πρόβλεψης της διατυπωθείσας σχέσης, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου μη προτυποποιημένες ποζολάνες χρησιμοποιούνται σε συστήματα τσιμέντου.

ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της εργασίας εξετάστηκαν δύο νέοι τρόποι αξιοποίησης Ελληνικών τεφρών υψηλού ασβεστίου μη συμμορφούμενων με το Εθνικό σχέδιο προδιαγραφών. Όσον αφορά στην αξιοποίηση της τέφρας με ακατάλληλα υψηλή περιεκτικότητα θεικών, προέκυψε πως μπορεί να αντικαταστήσει σημαντικό μέρος πρώτης ύλης χωρίς να επηρεαστούν οι χρόνοι πήξης. Τα νέα σύνθετα τσιμέντα απουσία γύψου εμφάνισαν τυπική κατανομή αντοχών με χαμηλές πρώιμες και ανταγωνιστικές μετέπειτα τιμές σε δοκιμή θλίψης. Με την εφαρμογή μεθόδου ενεργοποίησης οι αντοχές των δοκιμών αυξήθηκαν και ξεπέρασαν αυτές του δοκιμίου αναφοράς.

Η συνδυαστική μέθοδος του διαχωρισμού και της άλεσης που εφαρμόστηκε σε τυπική ασβεστούχα τέφρα οδήγησε στην παραγωγή κοκκομετρικού κλάσματος εμπλουτισμένου σε ενεργό πυρίτιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η ενσωμάτωση αυτού σε συστήματα τσιμέντου βελτίωσε αισθητά την μηχανική συμπεριφορά τους υπερνικώντας παράλληλα ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα της

τέφρας, των χαμηλών δηλαδή πρώιμων αντοχών με τις οποίες συνδέεται η χρήση της. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση (ι) απορριπτέων τεφρών με σκοπό την ανάκτηση κλασμάτων που θα ικανοποιούν τις προδιαγραφές του Εθνικού σχεδίου και συνεπώς θα επαναχρησιμοποιούνται και (ιι) που επιδιώκεται η παραγωγή καλής ποιότητας τεφρών με χρήση συγκεκριμένων κλασμάτων που συγκεντρώνουν επιθυμητά χαρακτηριστικά. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν πιστοποιήθηκε θεωρητική σχέση που συνδέει το ενεργό πυρίτιο της τέφρας με την μηχανική απόδοση του σύνθετου τσιμέντου μέσω της έννοιας του συντελεστή αποδοτικότητας (k -value). Η εφαρμογή αυτής της προσεγγιστικής σχέσης μπορεί να οδηγήσει σε μια πρώτη, σχετικά ασφαλή, πρόβλεψη της μελλοντικής μηχανικής συμπεριφοράς συστημάτων τσιμέντου και σκυροδέματος που ενσωματώνουν ακόμα και μη-προτυποποιημένες ιπτάμενες τέφρες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς πόρους (25%). Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος **‘Πυθαγόρας Ι: Ενίσχυση ερευνητικών ομάδων στο ΕΜΠ’**.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Cheerarot, R., Jaturapitakul, C., 2004. A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement, *Waste Management* 24, 701-709.
- [2] Xie, Y., Liu, B., Yin, J. and Zhou, S., 2002. Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash. *Cement and Concrete Research* 32, 477-480.
- [3] Brameshuber, W., S. Uebachs, 2003. The Influence of Air Voids on the Properties of Self-Compacting Concretes Containing Fly Ash. In: Wallevik, O. and Nielsson, I. (Eds.), *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Reykjavik, Iceland, pp. 870-880.
- [4] V.G Papadakis, S. Antiohos, S. Tsimas, Supplementary cementing materials in concrete – Part II: A fundamental estimation of the efficiency factor, *Cement and Concrete Research* 32: (2002) 1533-1538.
- [5] Papadakis, V.G., Tsimas, S. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Building-Sector Growth, European Commission DGXII, Marie Curie Fellowship, Final Scientific Report, Project No HPMF-CT-1999-00370, National Technical University of Athens, Greece, 2001.
- [6] Antiohos, S. and Tsimas, S., 2002. Reactive silica of fly ashes in relation to the burning condition of lignites, in: Dhir, R.K. (ed.), *Proceedings of the International Conference Challenges of Concrete Construction*, Dundee, Scotland, 2002, pp. 71-80.
- [7] S. Antiohos, S. Tsimas, Investigating the role of active silica in the hydration mechanisms of high-calcium fly ash/cement systems, *Cement and Concrete Composites* 27: (2005) 171-181.
- [8] Erdoglu, K., Turker, P., 1998. Effects of fly ash particle size on strength of Portland cement fly ash mortars, *Cement and Concrete Research* 28, 1217-1222.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Ε. Τσικαρδάνη, Ν. Κούκουζας, Ε. Κακαράς

*Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης – Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών
Στερεών Καυσίμων, 4^ο χλμ. Ε.Ο. Πτολεμαΐδας – Κοζάνης, Συγκρότημα ΑΕΒΑΛ, 50200 Πτολεμαΐδα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία υπολογίζει το κόστος των πρώτων υλών των μονάδων παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων, και το συγκρίνει με το κόστος που προκύπτει σε περίπτωση αντικατάστασης μέρους του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα που μπορεί να παραχθεί από το εργοστάσιο επεξεργασίας, ενώ εκτιμώνται και τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την αντικατάσταση αυτή. Σε ότι αφορά το οικονομικό σκέλος, παρουσιάζεται μείωση του κόστους των πρώτων υλών με την αντικατάσταση - που λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος μεταφοράς - η μείωση αυτή ανέρχεται στο 18 έως και 48% ανάλογα με το ποσοστό αντικατάστασης (30 – 70% αντικατάσταση τσιμέντου από ιπτάμενη τέφρα αντίστοιχα). Επίσης, προκύπτει μείωση των εκπομπών CO₂, NO_x, VOCs και CO η οποία κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική λαμβάνοντας υπόψη τις δεσμεύσεις της χώρας μας που απορρέουν από το πρωτόκολλο του Κυότο και την οδηγία 2001/81.

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, τσιμεντοπροϊόντα

FINANCIAL AND ENVIRONMENTAL EVALUATION OF FLY ASH USE FOR THE PRODUCTION OF CEMENT PRODUCTS

E. Tsikardani, N. Koukouzas, E. Kakaras

EKETA – ITESK, 4th km Ptolemaida-Kozani, AEVAL site, 50200 Ptolemaida

SUMMARY: This study evaluates the raw materials cost for the cement-products manufacturing plants and compares this cost to the cost in the case of partial substitution of fly ash for cement. The fly ash could be produced by the fly ash processing unit. The study evaluates also the environmental benefits of this substitution. The results of the study show that the substitution alternative lowers the cost of the raw materials and – considering also the transportation costs – the decrease varies between 18% and 48% of the initial cost. This range depends on the percentage of substitution of fly ash for cement (30 – 70 %). The environmental evaluation shows that there is a reduction on CO₂, NO_x, VOCs and CO emissions which is essential according to the Kyoto Protocol and the European Directive 2001/81.

Keywords: fly ash, cement products

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα που παράγεται από την Μονάδα Επεξεργασίας¹, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την κατασκευή τσιμεντοπροϊόντων (κυβόλιθοι, κράσπεδα κήπου και πεζοδρομίου, τσιμεντόλιθοι και τσιμεντοσωλήνες), μια και οι ιδιότητες της προσομοιάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του τσιμέντου. Έτσι, μπορεί να αντικαταστήσει αντίστοιχες ποσότητες τσιμέντου, παράγοντας τελικά προϊόντα με πολύ καλές αντοχές και ιδιότητες. Μέχρι σήμερα έχει δοκιμαστεί η αντικατάσταση έως και 70% τσιμέντου με επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα, χωρίς να υπάρξει σημαντική διαφοροποίηση των ιδιοτήτων.

Η λειτουργία της μονάδας και η ύπαρξη προδιαγραφών για την χρήση της επεξεργασμένης τέφρας στα υλικά αυτά, θα είχε ως αποτέλεσμα να τροφοδοτούνται οι επιχειρήσεις της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας κατ' αρχήν και των γύρω νομών στην συνέχεια, με επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα. Σήμερα λειτουργούν στην Περιφέρεια 34 επιχειρήσεις παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων, ενώ η κατανομή τους στους διαφόρους νομούς παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Αριθμός επιχειρήσεων κατασκευής τσιμεντοπροϊόντων στους νομούς της Δυτικής Μακεδονίας

<i>Νομός</i>	<i>Αριθμός επιχειρήσεων κατασκευής τσιμεντοπροϊόντων</i>
<i>Γρεβενών</i>	<i>10</i>
<i>Καστοριάς</i>	<i>10</i>
<i>Κοζάνης</i>	<i>11</i>
<i>Φλώρινας</i>	<i>3</i>
<i>ΣΥΝΟΛΟ</i>	<i>34</i>

Η αντικατάσταση του τσιμέντου ως πρώτη ύλη με επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα θα επιφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη για τους επιχειρηματίες της περιοχής, ενώ παράλληλα θα προκύψουν και περιβαλλοντικά οφέλη.

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Για την οικονομική αξιολόγηση του εγχειρήματος χρήσης της Ι.Τ. στα τσιμεντοπροϊόντα, γίνεται μια ενδεικτική κοστολόγηση της παραγωγικής διαδικασίας με σημερινές τιμές, και στη συνέχεια εξετάζονται σενάρια χρήσης διαφορετικών ποσοστών επεξεργασμένης Ι.Τ. ως υποκατάστατο του τσιμέντου. Στα σενάρια αυτά λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του κόστους των πρώτων υλών για την περίπτωση χρήσης ιπτάμενης τέφρας, ενώ τα βιομηχανικά έξοδα και οι δαπάνες του προσωπικού θεωρούνται ίδιες και στις δύο περιπτώσεις (με ή χωρίς τη χρήση Ι.Τ.). Επίσης δεν λαμβάνεται υπόψη το κόστος της εγκατάστασης, μια και πρόκειται για ένταξη της ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγική διαδικασία υφιστάμενων επιχειρήσεων που θα επιβαρυνθούν με ελάχιστο κόστος μετασκευών.

Για την κοστολόγηση των τσιμεντοπροϊόντων λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω τιμές κόστους των πρώτων υλών:

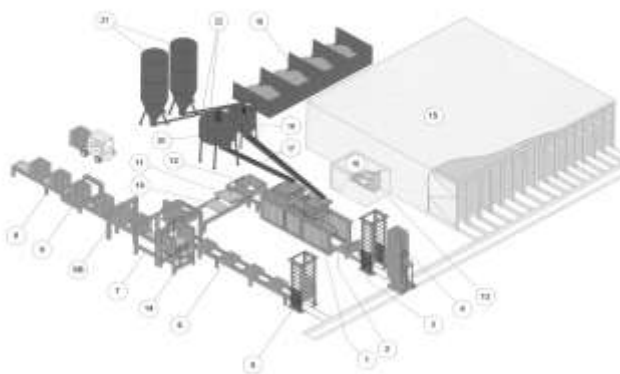
¹ Η μονάδα επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας βρίσκεται στον περίβολο του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας και είναι εκτός λειτουργίας από το 1997

Πίνακας 2. Κόστος πρώτων υλών για την παραγωγή τσιμεντοπροϊόντων

<i>Πρώτη Ύλη</i>	<i>Κόστος / μονάδα</i>
Τσιμέντο Λευκό (52,5N)	116,49 €/tn
Τσιμέντο Μαύρο (42,5N)	88,95 €/tn
Ακατέργαστη ιπτάμενη τέφρα²	2,95 €/tn
Κατεργασμένη ιπτάμενη τέφρα³	16,50 €/tn
Άμμος 0 – 1,5	3,05 €/tn
Άμμος 1,5 – 2,5	2,88 €/tn
Άμμος 2,5 – 4,0	2,88 €/tn
Άμμος 0 – 4	3,40 €/tn
Χρώμα κίτρινο	1.560,00 €/tn
Χρώμα μαύρο	1.560,00 €/tn
Χρώμα κόκκινο	1.620,00 €/tn
Νερό	1,68 €/tn

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- 1 Πρέσα
 - 2 Ταινιομεταφορέας προϊόντων
 - 3 Ανυψωτικό μηχάνημα πολλαπλών θέσεων
 - 4 Αυτόματο όχημα μεταφοράς
 - 5 Μηχάνημα καθέλκυσης
 - 6 Ταινιομεταφορέας
 - 7 Αυτόματο μηχάνημα στοίβαξης
 - 8 Ταινιομεταφορέας
 - 9B Οριζόντιος δεματοποιητής
 - 10 Κατακόρυφος δεματοποιητής
 - 11 Ταινία επιστροφής των άδειων καλουπιών
 - 12 Συσκευή αλλαγής καλουπιών
 - 13 Συσκευή τροφοδοσίας καλουπιών
 - 14 Πίνακας ελέγχου
 - 15 Αυτόματος πελλετοποιητής
 - 16 Χώρος ωρίμανσης
 - 17 Καμπίνα ελέγχου
 - 19 Ταινιομεταφορείς τροφοδοσίας αδρανών
 - 20 Σιλό αδρανών
 - 21 Αναμίκτης στρώματος επικάλυψης
 - 22 Αναμίκτης 1^{ου} στρώματος
- Σιλό τσιμέντου
Κοχλιόδρομος

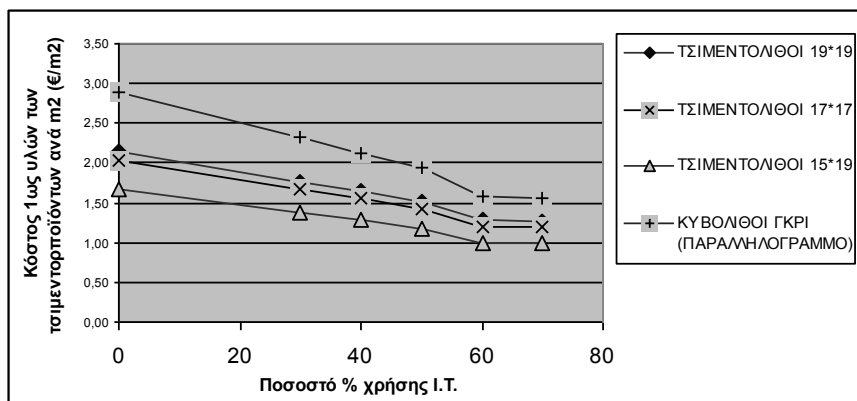


Σχήμα 1. Τυπική παραγωγική διαδικασία τσιμεντοπροϊόντων

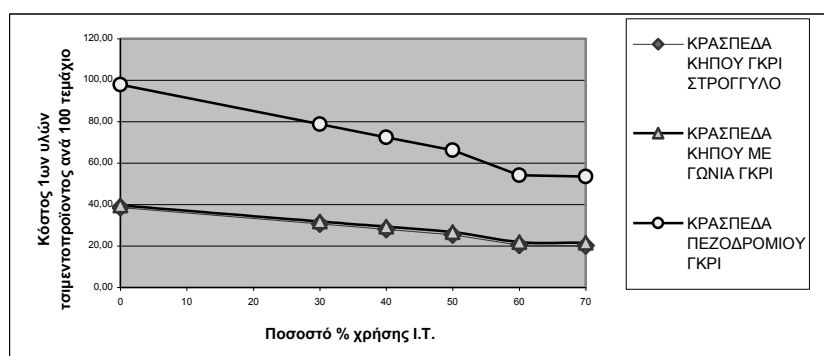
² Στοιχεία από ΑΗΣ Καρδιάς

³ Η τιμή αυτή προκύπτει από την επικαιροποίηση της Μελέτης Βιωσιμότητας – Σκοπιμότητας του Εργοστασίου Επεξεργασίας Ιπτάμενης Τέφρας που εκπόνησε το Κέντρο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων (Σεπτέμβριος 1998).

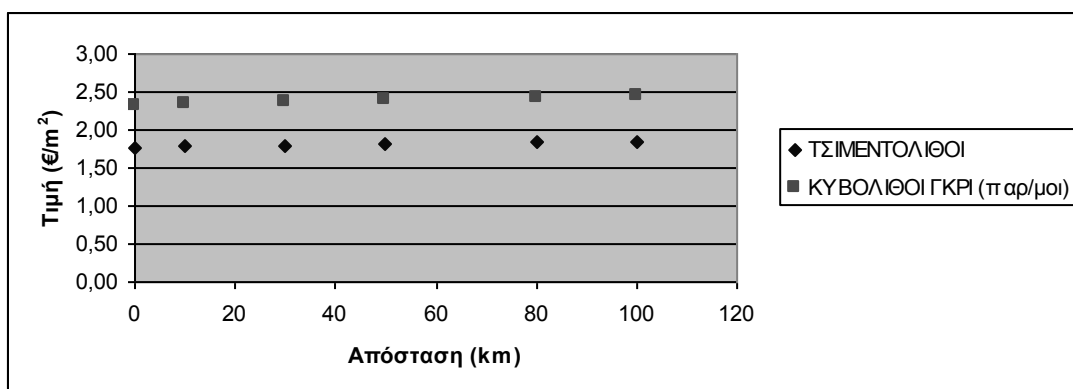
Με βάση τα ανωτέρω, έγινε σύγκριση του κόστους των 1^{ων} υλών μιας μονάδας παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων στην περίπτωση που χρησιμοποιεί στην παραγωγική διαδικασία επεξεργασμένη ιπτάμενη τέφρα σε διάφορα ποσοστά, σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση (μηδενική χρήση ιπτάμενης τέφρας). Η μείωση του κόστους των πρώτων υλών παρουσιάζεται στα διαγράμματα 1 και 2.



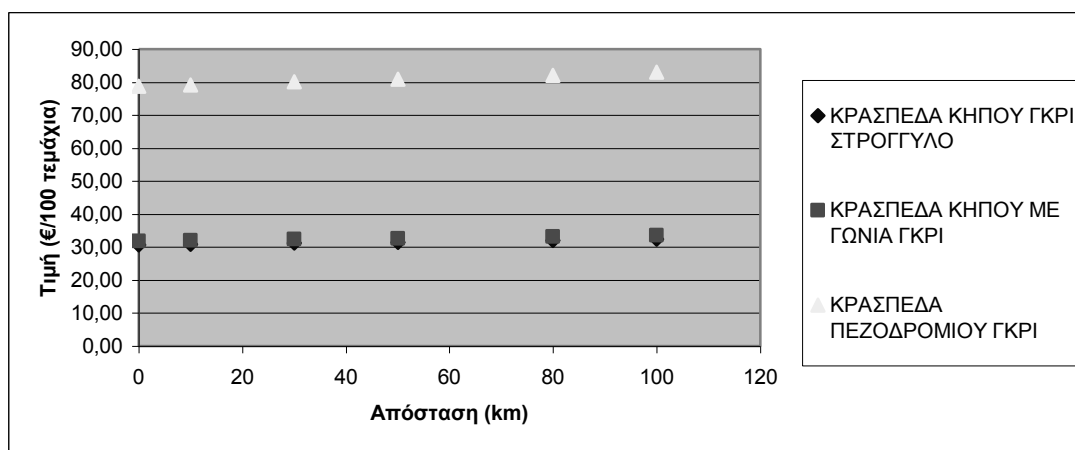
Διάγραμμα 1. Μείωση του κόστους των πρώτων υλών των τσιμεντοπροϊόντων σε περίπτωση χρήσης επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας σε διαφορετικά ποσοστά



Διάγραμμα 2. Μείωση του κόστους των πρώτων υλών των τσιμεντοπροϊόντων σε περίπτωση χρήσης επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας σε διαφορετικά ποσοστά



Διάγραμμα 3. Επίδραση της απόστασης της μονάδας παραγωγής ιπτάμενης τέφρας με την εγκατάσταση παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων στο κόστος των 1^{ων} υλών



Διάγραμμα 4. Επίδραση της απόστασης της μονάδας παραγωγής ιπτάμενης τέφρας με την εγκατάσταση παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων στο κόστος των 1^{ων} υλών.

Εάν ληφθεί υπόψη το κόστος μεταφοράς της ιπτάμενης τέφρας από την μονάδα επεξεργασίας στη μονάδα παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων, τότε θεωρώντας μια τιμή για την μεταφορά της τέφρας ίση με 0,1€/tn/km, υπολογίζεται ότι το κόστος αυτό επιβαρύνει το κόστος των 1^{ων} υλών των τσιμεντοπροϊόντων σε ποσοστό περίπου 2,5% για μεταφορά της τέφρας σε απόσταση 100km. Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή του κόστους των τσιμεντοπροϊόντων για διάφορες αποστάσεις από το εργοστάσιο επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας.

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΡΟΪΟΝΤΩΝ.

Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας στα εργοστάσια παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων της Δυτικής Μακεδονίας, επιφέρει περιβαλλοντικά οφέλη σε επίπεδο χώρας, για δύο λόγους:

1. Γιατί αντικαθιστά τσιμέντο, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές CO₂, NO₂, SO₂, VOCs που παράγονται κατά την παραγωγή τσιμέντου από την τσιμεντοβιομηχανία
2. Γιατί μειώνονται οι ποσότητες ρύπων που προκύπτουν από την μεταφορά των πρώτων υλών (μεταφορά ιπτάμενης τέφρας αντί για τσιμέντο, θεωρώντας ότι η Δυτική Μακεδονία προμηθεύεται τσιμέντο από την κοντινότερη πηγή (Θεσσαλονίκη)

Η λειτουργία των εργοστασίων παραγωγής τσιμέντου, έχει ως αποτέλεσμα να παράγονται κυρίως οι παρακάτω ρύποι για κάθε tn παραγόμενου τσιμέντου [Ε.Ε., 2001]

Από την άλλη, η μετακίνηση φορτηγών οχημάτων για την μεταφορά τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας, έχει ως συνέπεια την εκπομπή ρύπων, και συγκεκριμένα κυρίως των CO, NO_x και VOC. Οι συντελεστές εκπομπής για φορτηγά αυτοκίνητα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 3. Μέσοι συντελεστές ρύπων στην Ευρώπη
για τις τσιμεντοβιομηχανίες [Ε.Ε, 2001]

	Kg/ tn παραγόμενου τσιμέντου
CO ₂	600 - 780
NO _x (NO ₂)	0,3 – 4,5
SO ₂	0,02 – 5,25
Σκόνη	0,01 – 0,30
CO	0,75 – 3,00

Πίνακας 4. Συντελεστές εκπομπής ρύπων για φορτηγά οχήματα

Είδος οχήματος	Συντελεστές εκπομπής (g/km) για ταχύτητα 50km/h		
	CO	NO _x	VOC
Φορτηγά >16tn	0.6800	0.6600	0.2120

Εκτιμώντας ότι η χρήση της επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας θα γίνεται από τις μονάδες παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας, εκτιμήθηκε η μείωση των ρύπων που θα προκύψει από την μεταφορά της ιπτάμενης τέφρας από την μονάδα παραγωγής της στις πόλεις της Περιφέρειας και από την μεταφορά του τσιμέντου από την Θεσσαλονίκη. Ο πίνακας 5 παρουσιάζει τις εκπομπές των ρύπων σε κάθε περίπτωση, και την μείωση που προκύπτει από την χρήση της τέφρας. Να σημειωθεί ότι για την μεταφορά 165.000 tn τέφρας απαιτούνται 6.600 δρομολόγια ετησίως (25tn/δρομολόγιο).

Πίνακας 5. Εκπομπές ρύπων κατά την μεταφορά ιπτάμενης τέφρας και τσιμέντου - σύγκριση

Εκπομπές αερίων ρύπων από την μεταφορά τσιμέντου (g / δρομολόγιο)				
Διαδρομή	Απόσταση	CO	Nox	VOC
	km			
Κοζάνη - Θεσσαλονίκη	141	191,76	186,12	59,78
Καστοριά - Θεσσαλονίκη	226	307,36	298,32	95,82
Γρεβενά - Θεσσαλονίκη	192	261,12	253,44	81,41
Φλώρινα - Θεσσαλονίκη	166	225,76	219,12	70,38
Εκπομπές αερίων ρύπων από την μεταφορά ιπτάμενης τέφρας (g / δρομολόγιο)				
Διαδρομή	km	CO	Nox	VOC
Μονάδα Ι.Τ. - Κοζάνη	17	23,12	22,44	7,21
Μονάδα Ι.Τ. - Καστοριά	107	145,52	141,24	45,37
Μονάδα Ι.Τ. - Γρεβενά	71	96,56	93,72	30,10
Μονάδα Ι.Τ. - Φλώρινα	66	89,76	87,12	27,98
Μείωση εκπομπών αερίων ρύπων (g / δρομολόγιο)				
		CO	Nox	VOC
Μεταφορά Ι.Τ. αντί τσιμέντου στην Κοζάνη		168,64	163,68	52,58
Μεταφορά Ι.Τ. αντί τσιμέντου στην Καστοριά		161,84	157,08	50,46
Μεταφορά Ι.Τ. αντί τσιμέντου στα Γρεβενά		164,56	159,72	51,30
Μεταφορά Ι.Τ. αντί τσιμέντου στην Φλώρινα		136,00	132,00	42,40

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χρήση επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας στην παραγωγική διαδικασία των τσιμεντοπροϊόντων έχει ως αποτέλεσμα :

- Την μείωση του κόστους των πρώτων υλών για την παραγωγή τσιμεντοπροϊόντων, από 20% για αντικατάσταση του 30% του τσιμέντου μέχρι και 50% για αντικατάσταση του 70% του τσιμέντου.
- Η επιβάρυνση των λειτουργικών εξόδων με το κόστος μεταφοράς της τέφρας ανέρχεται σε ποσοστό 2,5% του κόστους των πρώτων υλών, για μεταφορά αυτής σε απόσταση 100km. Επομένως, η χρήση της ιπτάμενης τέφρας αποφέρει οικονομικά οφέλη και σε επιχειρήσεις παραγωγής τσιμεντοπροϊόντων εκτός της περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας, μια και το κόστος μεταφοράς δεν κρίνεται σημαντικό και είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το κόστος που προκύπτει από την χρήση φθηνότερου υλικού.
- Η χρήση 165.000 tn ιπτάμενης τέφρας ετησίως, έχει ως αποτέλεσμα:
 - Την μείωση εκπομπών CO₂ κατά 99.700tn από την μείωση της παραγωγής τσιμέντου
 - Την μείωση (κατά μέσο όρο):
 - 1040 kg CO/yr
 - 1010 kg NOx/yr
 - 325 kg VOC/yr
- Η μείωση των εκπομπών CO₂ κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, με δεδομένη την δέσμευση της χώρας μας που απορρέει από το πρωτόκολλο του Κιότο για συγκράτηση της αύξησης των εκπομπών του αερίου αυτού του θερμοκηπίου στο 25% μέχρι το 2012 σε σχέση με τις εκπομπές του 1990, στόχος που φαίνεται ότι δεν θα επιτευχθεί μια και η αυθόρμητη τάση των εκπομπών οδηγεί περίπου σε διπλάσιο ποσοστό αύξησης.
- Η μείωση των εκπομπών NOx είναι επίσης σημαντική, μια και καταγράφεται σημαντική απόκλιση από τους στόχους που θέτει η οδηγία 2001/81.
- Ιδιαίτερα σημαντική όμως είναι η μείωση των εκπομπών των VOCs καθώς καταγράφεται στην Ελλάδα σημαντική απόκλιση από τον στόχο που έχει θέσει η οδηγία 2001/81, και συγκεκριμένα καταγράφεται αύξηση 17% αντί για μείωση κατά 22% που είναι ο στόχος της εν' λόγω οδηγίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΕΑΠ, (2001), «Σχεδιασμός Έργων Υποδομής και Προστασία του Περιβάλλοντος» Τόμος Α, Α. Κόρας «Συγκοινωνιακά, Υδραυλικά, Ενεργειακά Έργα», Πάτρα.
2. Εθνικό Κέντρο Περιβάλλοντος & Αειφόρου Ανάπτυξης (ΕΚΠΑΑ), (2003) «Περιβαλλοντικά Σήματα», Σχέδιο Έκθεσης Δεικτών Αειφορίας, Αθήνα.
3. Κέντρο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων - ΚΤΕΣΚ, «Μελέτη Σκοπιμότητας – Βιωσιμότητας του εργοστασίου επεξεργασίας Ιπτάμενης Τέφρας», Σεπτέμβριος 1998, Πτολεμαΐδα.
4. Παπαγιάννη Ι. «Η χρήση της Ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας στο σκυρόδεμα και στα προϊόντα σκυροδέματος», Πρακτικά Δημερίδας: «Χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας στις Κατασκευές», Κοζάνη 3 – 4 /10/1987.

5. Τσίμας Σ., Μουτσάτσου-Τσίμα Α., «Εμπειρία από τη μονάδα άλεσης – κατεργασίας τέφρας στην Πτολεμαΐδα», Πρακτικά Δημερίδας: «Χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας στις Κατασκευές», Κοζάνη 3 – 4 /10/1987.
6. Τσικαρδάνη Ε., Κούκουζας Ν., Κακαράς Εμ. «Οφέλη από την λειτουργία του εργοστασίου επεξεργασίας της ιπταμένης τέφρας», 1^ο Συνέδριο ΕΒΗΠΑΡ, 24-26 Νοεμβρίου 2005, Θεσ/νίκη.
7. Νόμος Υπ' αριθ. 3017, 30/5/2002, "Κύρωση του Πρωτοκόλλου του Κιότο στη Σύμβαση – πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την αλλαγή του κλίματος.
8. Οδηγία 2001/81/ΕΚ Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23^{ης} Οκτωβρίου του 2001 σχετικά με τα ανώτερα όρια εκπομπών για ορισμένους ατμοσφαιρικούς ρύπους.

ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ

Ε. Τσικαρδάνη, Ν. Κούκουζας, Ε. Κακαράς

*Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης – Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών
Στερεών Καυσίμων, 4^ο χλμ. Ε.Ο. Πτολεμαΐδας – Κοζάνης, Συγκρότημα ΑΕΒΑΛ, 50200 Πτολεμαΐδα*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία πραγματεύεται το θέμα της αξιολόγησης της λειτουργίας του εργοστασίου επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας από οικονομική και περιβαλλοντική άποψη. Το εργοστάσιο είναι εγκατεστημένο στον χώρο του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας από το 1995, όπου και κατασκευάστηκε προκειμένου να επεξεργαστεί τέφρα για την κατασκευή του φράγματος της Πλατανόβρυσης. Έκτοτε είναι εκτός λειτουργίας, ενώ τα οικονομικά οφέλη για τον φορέα λειτουργίας είναι προφανή, και η λειτουργία του θα επιφέρει, ενεργειακά, και κοινωνικά οφέλη στην ευρύτερη περιοχή αλλά και σε επίπεδο χώρας. Ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται επίσης η μείωση των εκπομπών CO₂ που προκύπτει από την χρήση της ιπτάμενης τέφρας στις κατασκευές και την αντικατάσταση αντίστοιχης ποσότητας τσιμέντου, που ανέρχεται σε 155.650tn CO₂/έτος.

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, εργοστάσιο επεξεργασίας, μύλος, Πλατανόβρυση

BENEFITS OF THE OPERATION OF THE UNIT FOR THE FLY ASH PROCESSING

E. Tsikardani, N. Koukouzas, E. Kakaras

EKETA – ITESK, 4th km Ptolemaida-Kozani, AEVAL site, 50200 Ptolemaida

ABSTRACT: This study deals with the financial and environmental evaluation of the operation of the unit for the fly ash processing. The plant is located at the yard of the lignite-fired power plant of Ptolemaida since 1995, and it is constructed in order to process fly ash for Platanovrisi dam. Since then, it is out of order, while the economic benefits are obvious for the operator, and its operation will bring energy and social benefits at a regional and national level. Also the environmental benefits are considered to be very important, as the CO₂ emissions – raising annually at 155.650 tons – will decrease due to the substitution of cement with the same quantity of fly ash in the construction sector.

Keywords: fly ash, processing unit, mill, Platanovryssi

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το εργοστάσιο επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας ανήκει στην ΔΕΗ Α.Ε., και βρίσκεται στον περίβολο του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, στο 7^ο χλμ. της Εθνικής Οδού Πτολεμαΐδας – Κοζάνης. Η γειτνίασή του με τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας παρέχει την δυνατότητα απευθείας τροφοδοσίας της μονάδας με ακατέργαστη τέφρα, μέσω πνευματικού συστήματος. Η κατασκευή του εργοστασίου διήρκεσε περίπου 2 χρόνια (1993 – 1995) και η μελέτη και κατασκευή του αποτέλεσαν τμήμα της όλης σύμβασης κατασκευής του φράγματος της Πλατανόβρυσης, που ανατέθηκε στην κοινοπραξία ΑΕΓΕΚ – ΗΙΔΡΟΓΡΑΝΙΑ – ΑΣΙ R.C.C.

Ο λόγος για την κατασκευή του εργοστασίου ήταν η κατάλληλη επεξεργασία ιπτάμενης τέφρας που προέρχονταν από το εργοστάσιο της Πτολεμαΐδας ώστε να καταστεί κατάλληλη και να χρησιμοποιηθεί ως 4^ο συστατικό για το μίγμα των κονιών που θα χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή του φράγματος της Πλατανόβρυσης.

Το φράγμα της Πλατανόβρυσης βρίσκεται επί του ποταμού Νέστου στο Νομό Δράμας. Απέχει από το εργοστάσιο επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας περίπου 400 χιλιόμετρα, και είναι από τα υψηλότερα φράγματα της Ευρώπης με ύψος 95 m, που είναι κατασκευασμένο με κυλινδρικό σκυρόδεμα που περιέχει υψηλό ποσοστό τέφρας (82% - 500kg τσιμέντου και 225 kg ιπτάμενης τέφρας για κάθε m³).

Οι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν στην κατασκευή του εργοστασίου, ήταν η άρση των παραμέτρων που αποτελούν παρεμποδιστικό παράγοντα για την χρήση της ιπτάμενης τέφρας στο σκυρόδεμα, και συγκεκριμένα:

- ✓ Η ανομοιογένειας της ακατέργαστης τέφρας, η οποία οφείλεται στην διαφορετική ποιότητα του λιγνίτη και στις διαφορετικές συνθήκες καύσης που επικρατούν στους λέβητες των ΑΗΣ.
- ✓ Η ανάγκη για συμπληρωματική άλεση των τεφρών, που προκύπτει από το γεγονός ότι οι ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες των ιπτάμενων τεφρών εκδηλώνονται με την μείωση της κοκκομετρίας τους. Στόχος ήταν η μείωση του μεγέθους των κόκκων της τέφρας ώστε το υπόλοιπο στο κόσκινο των 45μm να είναι 20 – 30%.
- ✓ Η μείωση των τιμών των ελεύθερων οξειδίων του ασβεστίου σε ποσοστό κάτω του 3%, λόγω του ότι το ελεύθερο οξείδιο του ασβεστίου προκαλεί προβλήματα διογκώσεων και ανεπιθύμητες θερμοκρασιακές αυξήσεις.
- ✓ Η μείωση του υψηλού ποσοστού θεικών που εμφανίζονται συχνά στις τέφρες της περιοχής Πτολεμαΐδας σε ποσοστό κάτω του 1%.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά επιτυγχάνονταν, χάρη

- ✓ στην λειτουργία της μονάδας άλεσης και επεξεργασίας της τέφρας, που περιέχει τον μύλο με όλον τον προβλεπόμενο εξοπλισμό
- ✓ στην αξιοποίηση των 3 σιλό ομογενοποίησης που βρίσκονται στην περιοχή του συγκροτήματος και των 6 σιλό ομογενοποίησης που βρίσκονται στον περιοχή του φράγματος της Πλατανόβρυσης.
- ✓ Στην λειτουργία εργαστηρίου ποιοτικού ελέγχου ανεπεξέργαστης και επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας που διαθέτει η μονάδα και στους συνεχείς ελέγχους της πρώτης ύλης, του ενδιάμεσου και του τελικού προϊόντος, και στην συνέχεια στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας τα μονάδας.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑΤΟΣ

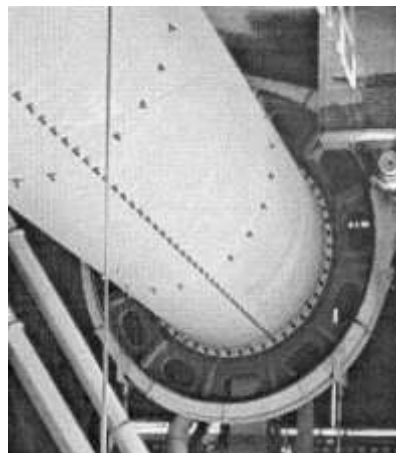
Ο περιστρεφόμενος μύλος έχει ονομαστική δυναμικότητα 23tn/h ή ~500t/24ωρο, διάμετρο 2,6 m και μήκος 12 m. Μπορεί επίσης να λειτουργήσει με μεγαλύτερες τιμές δυναμικότητας, παράγοντας όμως υλικό μεγαλύτερης κοκκομετρίας και επιτυγχάνοντας μικρότερο ποσοστό υδρόλυσης του προϊόντος. Η τροφοδότησή του γίνεται μέσω κλειστού συστήματος πνευματικής μεταφοράς από τις μονάδες του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας ή με την βοήθεια σιλοφόρων οχημάτων. Χωρίζεται σε τρία διαμερίσματα με την βοήθεια δύο κυκλικών διαφραγμάτων τα οποία στο κέντρο είναι ανοιχτά.

Η ακατέργαστη τέφρα, της οποίας οι ιδιότητες έχουν ελεγχθεί, εισέρχεται αφού προθερμανθεί στους 110 – 130°C στο πρώτο διαμέρισμα του μύλου, όπου ψεκάζεται με νερό με στόχο την δέσμευση του μεγαλύτερου ποσοστού του διαθέσιμου CaO το οποίο μετατρέπεται σε Ca(OH)₂. Η προθέρμανση της τέφρας επιτυγχάνεται με καύση μίγματος προπανίου – βουτανίου, ενώ λόγω της αντίδρασης υδρόλυσης του ασβεστίου η οποία είναι εξώθερμος, η θερμοκρασία της τέφρας εντός του μύλου διατηρείται στους ~120°C. Η γωνία ψεκασμού του νερού είναι σημαντική παράμετρος για την βέλτιστη λειτουργία του μύλου, ενώ το σύστημα ψεκασμού έχει σχεδιασθεί για να μπορεί να προσθέτει έως και 48 l/min (5-12,5%)

Κατόπιν, το μίγμα μεταφέρεται με υπερχειλίση, μέσω του ανοίγματος του διαφράγματος στο δεύτερο και στο τρίτο διαμέρισμα του μύλου. Εντός των δύο αυτών διαμερισμάτων υπάρχουν σφαιρίδια διατομής 40 και 30 mm, και συνολικού βάρους 42 τόνων, ισοβαρών κατανεμημένα, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η άλεση της τέφρας. Ο βαθμός πλήρωσης του μύλου ανέρχεται στο 30%, και καλύπτεται από τα αλεστικά σώματα και το προς επεξεργασία υλικό. Τα σφαιρίδια αποτελούνται από χάλυβα, με 11 – 13% χρώμιο και σκληρότητα 600 brinel.

Μετά την έξοδό της από τον μύλο, η επεξεργασμένη πλέον τέφρα αποθηκεύεται σε τρία (3) σιλό χωρητικότητας 200m³ το καθένα. Στα σιλό αυτά επιτυγχάνεται μια κατ' αρχήν ομογενοποίηση του υλικού. Στην συνέχεια, με κατάλληλες διατάξεις το υλικό φορτώνεται σε ειδικά σιλοφόρα οχήματα, προκειμένου να οδηγηθεί για χρήση. Παράλληλα, υπάρχει τοποθετημένο και ένα τέταρτο σιλό, μικρότερης χωρητικότητας που χρησιμοποιείται για την απόρριψη της παραγωγής όταν τα χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης τέφρας είναι εκτός των ορίων των προδιαγραφών.

Περαιτέρω ομογενοποίηση κατά την διάρκεια κατασκευής του φράγματος της Πλατανόβρυσης επιτυγχάνοντας στα σιλό αποθήκευσης χωρητικότητας 420m³ το καθένα, τα οποία είναι τοποθετημένα – ακόμη και στις μέρες μας - στον τόπο κατασκευής του φράγματος.



Εικόνα 1. Ο μύλος του συγκροτήματος

Για την παρακολούθηση των ιδιοτήτων του υλικού και κατ' επέκταση τον έλεγχο της λειτουργίας της εγκατάστασης κατά την διάρκεια λειτουργίας του μύλου ώστε να παραχθεί τέφρα για την κατασκευή του φράγματος της Πλατανόβρυσης, θεσπίστηκαν από την ΔΕΗ τέσσερα επίπεδα ελέγχου:

- Στο πρώτο επίπεδο γινόταν ο έλεγχος της ακατέργαστης τέφρας στα σιλό των ΑΗΣ, ώστε να πληροί την απαίτηση για μέγιστο ποσοστό θειϊκών 7% και οξειδίου του ασβεστίου μικρότερο του 13%. Παράλληλα, γινόταν εκτίμηση για την αναμενόμενη ποιότητα της τέφρας με την οποία πρόκειται να τροφοδοτηθεί η μονάδα τις αμέσως επόμενες ώρες. Ο έλεγχος επιτυγχάνονταν με την λήψη δειγμάτων ανά δώρο προερχόμενα από συνεχή δειγματοληψία μέσω ειδικής διάταξης, προσαρμοσμένη στους αγωγούς τροφοδοσίας των σιλό των ΑΗΣ.
- Στο δεύτερο επίπεδο, γινόταν έλεγχος της λειτουργίας του μύλου με την λήψη δειγμάτων ανά δώρο και μετρήσεις διαθέσιμου CaO και ελεύθερου CaO. Μέσω της σύγκρισης των τιμών αυτών, εξάγονταν συμπεράσματα για την απαιτούμενη ποσότητα νερού που ψεκάζεται στον μύλο.
- Στο τρίτο επίπεδο ελέγχου η δειγματοληψία γινόταν κατά τη διάρκεια της φόρτωσης των σιλοφόρων οχημάτων, στα οποία γινόταν έλεγχος του ελεύθερου CaO, του SO₃ και της υγρασίας.
- Το τέταρτο και τελευταίο επίπεδο ελέγχου γινόταν σε καθημερινά δείγματα που λαμβάνονταν από τα 6 σιλό ομογενοποίησης, ώστε να ελεγχθεί κατά πόσο το επεξεργασμένο υλικό ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του προϊόντος.

ΟΦΕΛΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΠΤ. ΤΕΦΡΑΣ

Τα στοιχεία της παρούσας εργασίας, προκύπτουν από την αναθεώρηση της μελέτης που εκπόνησε το 1998 το Κέντρο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Κανσίων σε συνεργασία με την ΙΝΤΕΛΕΚ Μελετητική Α.Ε. στα πλαίσια του προγράμματος Ανάπτυξης της Καινοτομίας για την Δυτική Μακεδονία (RIS+ - Regional Innovation System) κατ' εντολή της Αναπτυξιακής Δυτικής Μακεδονίας ΑΝΚΟ Α.Ε.

Πίνακας 1. Εξοπλισμός του εργοστασίου επεξεργασίας της τέφρας και κόστος αυτού [ΚΤΕΣΚ, 1998]

<i>Κατηγορία έργου</i>	<i>Κόστος σε τιμές 1997 (€)</i>	<i>Εκτιμώμενη διάρκεια ζωής (Έτη)</i>	<i>Αγοραία Αξία 1998 λόγω απαξίωσης (€)</i>
A. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ			
<i>Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός</i>	2.751.900,2	15	2.018.060,2
<i>Εγκαταστάσεις - σωληνώσεις</i>	553.925,2	15	406.211,8
<i>Υποσταθμός Η/Ρ</i>	26.588,4	15	19.498,2
<i>Εργαστήριο (εξοπλισμός)</i>	177.256,1	15	129.987,8
<i>Δεξαμενές LPG</i>	8.862,8	15	6.499,4
Σύνολο:	3.518.532,6		2.580.257,3
B. ΚΤΙΡΙΑ			
			0,0
<i>Κτίρια</i>	806.515,0	20	645.212,0
<i>Εργαστήριο (Κτιριακά)</i>	44.314,0	20	35.451,2
Σύνολο:	850.829,1		680.663,2
Γ. ΟΙΚΟΠΕΔΟ	44.314,0	<i>Απεριόριστη</i>	44.314,0
ΣΥΝΟΛΟ:	4.413.675,7		3.305.234,5

Οικονομικά οφέλη για τον φορέα λειτουργίας του εργοστασίου

Σύμφωνα με την προαναφερόμενη μελέτη, η αξία του εξοπλισμού και της υπάρχουσας επένδυσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Για την εύρυθμη λειτουργία του εργοστασίου, αλλά και την καλύτερη διακίνηση του προϊόντος με ενσάκκιση 1/3 από την συνολικά παραγόμενη ποσότητα ετησίων, προτείνεται η αγορά νέου εξοπλισμού μετά τον 1^ο και 2^ο χρόνο λειτουργίας, επεκτάσεις στο υφιστάμενο κτίριο και μεταφορά των 6 σιλό αποθήκευσης από το φράγμα της Πλατανόβρυσης στον χώρο του εργοστάσιο για να επιτυγχάνεται η ομογενοποίηση του προϊόντος. Η αναλυτική παρουσίαση των παραπάνω ενεργειών καθώς και το κόστος τους παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Στα πλαίσια της παρούσας, σε ότι αφορά τον υφιστάμενο εξοπλισμό (πίν. 1) εκτιμάται ότι η τιμή του παραμένει η ίδια με την αγοραία τιμή του 1998, θεωρώντας ότι η παλαιώσή του αυτά τα έτη δεν υπερβαίνει τον ετήσιο πληθωρισμό, μια και πρόκειται για μια τεχνολογία η οποία δεν θεωρείται παλαιωμένη, είναι επίκαιρη στον τομέα της επεξεργασίας της τέφρας ακόμη και σήμερα και ο εξοπλισμός δεν λειτουργεί από το 1997 αλλά και συντηρείται.

Πίνακας 2. Κόστος προτεινόμενων ενεργειών επέκτασης του εργοστασίου στα 2 πρώτα χρόνια λειτουργίας [ΚΤΕΣΚ, 1998]

Αγορές, ενέργειες και επεκτάσεις της μονάδας στον 1^ο χρόνο λειτουργίας	
Κατηγορία έργου	Κόστος (τιμές 1998) (€)
Μεταφορά & εγκατάσταση 6 σιλό ομογενοποίησης από Πλατανόβρυση (6 X 420 m ³)	293.470
Αγορά 2 σιλοφόρων οχημάτων	190.755
Αγορά 2 κλαρκ	29.347
Κατασκευή αποθήκης ενσάκκισμένου προϊόντος	205.429
Κτίρια Διοίκησης	117.388
Διάφορα	58.694
ΣΥΝΟΛΟ	895.083
Αγορές, ενέργειες και επεκτάσεις της μονάδας στον 2^ο χρόνο λειτουργίας	
Κατηγορία έργου	Κόστος (τιμές 1998), (€)
Μονάδα ενσάκκισης (200 σάκκους/hr)	117.388
Αγορά 2 σιλοφόρων οχημάτων	220.102
ΣΥΝΟΛΟ	337.490

Σε ότι αφορά τον εξοπλισμό που προτείνεται να αγοραστεί από την επιχείρηση που θα αναλάβει την λειτουργία του εργοστασίου (Πίν. 2), η τιμή αυτού αυξήθηκε κατά την τιμή του πληθωρισμού από το 1998 έως και σήμερα, λαμβάνοντας μέση τιμή πληθωρισμού αυτά τα έτη ίση με 4%.

Για την οικονομική ανάλυση λήφθηκαν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι:

- ✓ Το κόστος της ακατέργαστης τέφρας, ίσο με 2,95 €/tn
- ✓ Το κόστος των υπόλοιπων 1^{ων} υλών, και συγκεκριμένα:
 - Κόστος νερού (0,73 €/m³)
 - Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (0,06 €/kWh για καταναλωτή μέσης τάσης)
 - Κόστος υγραερίου (0,63 €/kg)
- ✓ Κόστος εργατικών, θεωρώντας 22 άτομα προσωπικό τον 1^ο χρόνο λειτουργίας και 27 άτομα μετά το 2^ο χρόνο λειτουργίας
- ✓ Κόστος ενσάκκισης, θεωρώντας ότι μετά το 2^ο έτος το 1/3 της παραγόμενης ποσότητας ενσακκίζεται και το κόστος ενσάκκισης είναι το 2% επί των πωλήσεων ενσακκισμένου προϊόντος.
- ✓ Το κόστος συντήρησης που λαμβάνεται ίσο με 2% επί των πωλήσεων.
- ✓ Το κόστος προώθησης πωλήσεων και R&D ίσο με 7% επί των πωλήσεων της πρώτη πενταετία και 5% από εκεί και μετά.
- ✓ Το κόστος αποσβέσεων, τόκων και φόρων

Επίσης, σε ότι αφορά την λειτουργία του εργοστασίου, έγινε η παραδοχή ότι τον 1^ο χρόνο λειτουργίας το εργοστάσιο θα λειτουργήσει στο 65% της ονομαστικής του δυναμικότητας, ενώ από τον 2^ο χρόνο και μετά στο 100 %, 6 ημέρες την εβδομάδα.

Οι δείκτες οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του επενδυτικού σχεδίου είναι:

- ✓ **Η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) και**
- ✓ **Ο Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (IRR)**

Από την ανάλυση προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επένδυση είναι βιώσιμη, όταν η τιμή της επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας ξεπερνά τα 16,5 €, τιμή που αντιστοιχεί περίπου στο 20% της τιμής του τσιμέντου. Να σημειωθεί ότι τα μεγέθη αυτά προέκυψαν θεωρώντας επιτόκιο προεξόφλησης ίσο με 6%. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Επίσης, από την ανάλυση ευαισθησίας προκύπτει ότι η επένδυση έχει μεγάλη ευαισθησία στην τιμή πώλησης της επεξεργασμένης τέφρας.

Πίνακας 3. Καθαρή παρούσα αξία και Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης για τα διάφορα σενάρια

ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ Ι.Τ. (€)	16,0	16,5	17,0	17,5
<i>Κ.Π.Α. (Ν.Ρ.Υ.) (χιλ. €)</i>	-5,30	383,62	772,55	1.161,47
<i>Ε.Σ.Α. (Ι.Ρ.Ρ.)</i>	5,98%	7,70%	9,34%	10,93%

Αναφορικά με την ανάλυση για την εύρεση του νεκρού σημείου της επένδυσης στις πωλήσεις του προϊόντος, προκύπτει ότι μειώνεται σημαντικά το νεκρό σημείο από τον δεύτερο χρόνο λειτουργίας της μονάδας, γεγονός που σημαίνει μικρό ρίσκο για τον ενδιαφερόμενο επενδυτή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Μεταβολή του νεκρού σημείου της επένδυσης ανάλογα με την τιμή του προϊόντος και το έτος λειτουργίας της μονάδας

Έτος	Τιμή τέφρας 16,5 €	Τιμή τέφρας 17,0 €	Τιμή τέφρας 17,5 €
1ο έτος	95,44%	87,03%	80,06%
2ο έτος	56,36%	52,53%	49,24%
3ο έτος	54,75%	51,08%	47,91%
4ο έτος	52,04%	48,59%	45,62%
5ο έτος	49,48%	46,24%	43,45%
6ο έτος	43,65%	40,75%	38,25%
7ο έτος	33,06%	30,94%	29,11%
8ο έτος	13,95%	13,22%	12,58%
9ο έτος	11,99%	11,40%	10,89%
10ο έτος	11,60%	11,05%	10,56%

Τέλος, η συμμετοχή των διαφόρων εξόδων στα συνολικά λειτουργικά έξοδα της μονάδας, παρουσιάζεται στον πίνακα 5. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με το μεγαλύτερο ποσοστό στα λειτουργικά έξοδα συμμετέχουν οι μισθοί, και έπεται το κόστος αγοράς της ακατέργαστης τέφρας και το κόστος αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 5. Συμμετοχή των επιμέρους δαπανών στα συνολικά έξοδα της επένδυσης

Κατηγορία Δαπάνης	% των λειτουργικών εξόδων (1 ^ο έτος λειτουργίας)	% των λειτουργικών εξόδων (2 ^ο έτος λειτουργίας)
Αγορά 1 ^{ης} ύλης	25,1	27,6
Μισθοί – εργατικά	35,3	30,4
Κόστος νερού	1,0	1,1
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	23,6	23,3
Κόστος υγραερίου	12,2	13,3
Κόστος ενσάκκισης	-	1,1
Κόστος συντήρησης	2,8	3,2
Σύνολο:	100,0	100,0

Περιβαλλοντικά και ενεργειακά οφέλη από την λειτουργία της μονάδας.

Η Ελληνική ιπτάμενη τέφρα αποτελεί αναβαθμισμένο υλικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως π.χ. για την παραγωγή άοπλου σκυροδέματος, ως πρώτη ύλη για την

παραγωγή τσιμεντοπροϊόντων, τούβλων, κονιαμάτων κ.λ.π.. Στις περισσότερες εφαρμογές, η χρήση της έχει ως συνέπεια την αντικατάσταση αντίστοιχου ή μικρότερου ποσού τσιμέντου. Προκειμένου να γίνει μια εκτίμηση για τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη που θα προκύψουν από την λειτουργία του εργοστασίου, θεωρείται ότι αντικαθιστά σε κάθε περίπτωση ίση ποσότητα τσιμέντου.

Κατά την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου, παράγονται σημαντικές ποσότητες CO₂ κατά την παραγωγή κλίνκερ. Συγκεκριμένα, κατά την παραγωγή ενός τόνου κλίνκερ εκλύονται 600 kg CO₂, ενώ ταυτόχρονα καταναλώνεται ενέργεια ίση με 3500 – 5000 MJ/tn [EC, 2001]. Θεωρώντας ότι μπορεί να αντικατασταθεί ίση ποσότητα τσιμέντου με την τέφρα που θα παραχθεί από το εργοστάσιο σε ένα χρόνο, προκύπτει ότι από την μη παραγωγή τσιμέντου μειώνονται οι ποσότητες εκπεμπόμενου CO₂ κατά **99.000 tn /έτος** και καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια κατά **701.250.000 MJ/έτος**.

Από την άλλη, κατά την παραγωγή της επεξεργασμένης ιπτάμενης τέφρας, καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία του εργοστασίου, καθώς και υγραέριο για την προθέρμανση της τέφρας πριν την εισαγωγή της στον μύλο. Συγκεκριμένα, για την επεξεργασία ενός τόνου επεξεργασμένης τέφρας, καταναλώνονται:

2,26 kg υγραερίου / tn τέφρας και 158,4 MJ ηλεκτρικής ενέργειας/ tn τέφρας

Λαμβάνοντας υπόψη και την ενέργεια του υγραερίου, προκύπτει ότι η **πρωτογενής ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή ενός τόνου τέφρας ισούται με 553 MJ ή 91.245.000 MJ/έτος**.

Επομένως, η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας από την αντικατάσταση τσιμέντου από τέφρα ισούται με: **610.005.000 MJ/έτος**.

Η εκτίμηση της ποσότητας του εκπεμπόμενου CO₂, προκύπτει με βάση την σχέση :

$$\text{Εκπομπές CO}_2 = [\text{κατανάλωση καυσίμου, tn}] \times [0,04731 \text{ MJ/tn}] \times [62,44 \text{ tn CO}_2/\text{MJ}] \times 0,99$$

Έτσι, η συνολική ποσότητα CO₂ που καταναλώνεται από την καύση 2,26kg υγραερίου/tn τέφρας, ισούται με: **~1100tn CO₂ /έτος**. Επομένως, το όφελος από την μείωση των εκπομπών του CO₂ είναι **97.900 tn/έτος**, το οποίο ανέρχεται σε ποσοστό ίσο με 0,3% από τις συνολικές εκπομπές CO₂ από την τσιμεντοβιομηχανία.

Πίνακας 6. Ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών και ενεργειακών οφελών από την λειτουργία του εργοστασίου.

	Εκπομπές CO ₂ / έτος (tn/έτος)	Καταναλισκόμενη ενέργεια (MJ/έτος)
Παραγωγή 165.000 tn τσιμέντου ετησίως / έτος	99.000	701.250.000
Παραγωγή 165.000 tn επεξεργασμένη τέφρας / έτος	1.100	91.245.000
Όφελος από την αντικατάσταση του τσιμέντου με τέφρα ανά έτος	97.900	610.005.000

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λειτουργία της μονάδας επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας, θα επιφέρει σημαντικά οφέλη στην ευρύτερη περιοχή, και συγκεκριμένα:

- ✓ Δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και ευκαιριών απασχόλησης
- ✓ Ενίσχυση της περιφερειακής οικονομίας
- ✓ Θετική επίπτωση στα δημόσια οικονομικά
- ✓ Μείωση του κόστους των κατασκευών
- ✓ Ωθηση στην ανάπτυξη της έρευνας και τεχνολογίας
- ✓ Εξοικονόμηση ενέργειας
- ✓ Και μείωση των εκπομπών CO₂, που ιδιαίτερα μετά την εφαρμογή του πρωτοκόλλου του Κυότο το οποίο τέθηκε σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου του 2006, η μείωση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την χώρα μας, μια και θα συμβάλει στην επίτευξη του στόχου της αύξησης των εκπομπών του CO₂ σε ποσοστό όχι μεγαλύτερο από 25% μέχρι το 2010, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, στόχος που σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη του Αστεροσκοπείου Αθηνών δεν θα επιτευχθεί αλλά θα ξεπεραστεί σημαντικά φτάνοντας η αύξηση στο 39,2%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. European Commission, “Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)” Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries, December 2001 (<http://eippcb.jrc.es>).
2. Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, «Greece – National Inventory Report 2005», www.noa.gr.
3. ΕΤΒΑ, «Εγχειρίδιο αξιολόγησης επενδυτικών σχεδίων» Εκδόσεις Παπαζήση, 1985, Αθήνα.
4. Κέντρο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων - ΚΤΕΣΚ, «Μελέτη Σκοπιμότητας – Βιωσιμότητας του εργοστασίου επεξεργασίας Ιπτάμενης Τέφρας», Σεπτέμβριος 1998, Πτολεμαΐδα.
5. Κουλουμούνδρας Σ. «Μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών θερμοκηπίου: Δικαιώματα εκπομπής ρύπων για τις ελληνικές επιχειρήσεις», «ΔΕΛΤΙΟ» Π.Σ.Δ.Μ.-Η., τεύχος 376, 2005.
6. Παπαγιάννη Ι. «Η χρήση της Ιπτάμενης τέφρας Πτολεμαΐδας στο σκυρόδεμα και στα προϊόντα σκυροδέματος», Πρακτικά Διημερίδας: «Χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας στις Κατασκευές», Κοζάνη 3 – 4 /10/1987.
7. Τσίμας Σ., Μουτσάτσου-Τσίμα Α., «Εμπειρία από τη μονάδα άλεσης – κατεργασίας τέφρας στην Πτολεμαΐδα», Πρακτικά Διημερίδας: «Χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας στις Κατασκευές», Κοζάνη 3 – 4 /10/1987.

ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ: ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟ ΑΠΟΒΛΗΤΟ Ή ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝ?

Σ. Ττσokος

Δημοτικός Σύμβουλος Δήμου Πτολεμαΐδος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η Ι.Τ. έχει διαγράψει μισό αιώνα παρουσίας στις περιοχές, όπου φιλοξενείται η δραστηριότητα της λιγνιτικής ηλεκτροπαραγωγής. Αναμφίβολα η Ι.Τ. συνιστά ρύπο, και η κοινωνία -διαχρονικά- την κατέστησε δυνάστη της. Αναδείχθηκε ό,τι υπονόμει την ανάπτυξή της και υπονομεύθηκε ό,τι ευνοούσε την προοπτική στην κατεύθυνση αυτή. Χρεώθηκε η περιοχή την παρουσία της, όμως δεν πιστώθηκε η κοινωνία τα οφέλη. Και ο "παραγωγός" της όμως, δεν υπολείπεται σε υστέρηση αντικειμενικής εκτίμησης των δυνατοτήτων εφαρμογής του υλικού, παρότι έχει στη διάθεσή του τα ερευνητικά δεδομένα. Μέχρι πρόσφατα το διαχειρίζεται ως απόβλητο. Το μέλλον θα δείξει, αν συνειδητοποιήθηκε ως παραπροϊόν, της παραγωγικής του διαδικασίας, με εκδήλωση έμπρακτης βούλησης και εξορθολογισμό της διαχείρισής της. Στον αντίποδα ο "χρήστης", αξιοποίησε την τεχνογνωσία του, έλεγξε το κόστος παραγωγής του προϊόντος του, και ενίσχυσε την ανταγωνιστικότητά του. Περιβαλλοντικά ωφέλησε και την περιοχή, όπου δραστηριοποιείται, εξοικονομώντας ορυκτά και ενέργεια. Η Πολιτεία ωφελήθηκε επίσης περιβαλλοντικά, ανά την επικράτεια, με την εξοικονόμηση (ορυκτών) πόρων, αλλά και ενέργειας, ενώ και η εθνική οικονομία προσπορίσθηκε οικονομικά οφέλη, έμμεσα, από των κύκλο εργασιών του "χρήστη", αλλά και την εξοικονόμηση απαιτούμενων επενδύσεων, για την παραγωγή (ηλεκτρικής) ενέργειας. Η πρόσφατη Σύνταξη Εθνικών Προδιαγραφών, για Επέκταση Χρήσης της (Ca/Χου) Τέφρας, είναι ένα "βήμα" για περαιτέρω αξιοποίησή της. Οι εκδηλούμενοι "διαγκωνισμοί" τεφροπαραγωγών, συνιστά στην Πολιτεία να επιβάλει αυτό το βήμα, να πραγματοποιηθεί, και να μη μένει "μετέωρο". Και όχι μόνον. Οι επαπειλούμενοι αποκλεισμοί τεφρών, σε διεθνές πλαίσιο, υποχρεώνουν να γίνει "βηματισμός". Η αναίρεση αμοιβαίων επιφυλάξεων και η κοινωνικοποίηση των προοπτικών θα μετατρέψει τον βηματισμό σε "καλπασμό" (ανάπτυξης) επ' ωφελεία όλων: Κοινωνίας, Πολιτείας, Χρηστών. Προαπαιτούμενο στην κατεύθυνση αυτή είναι η αναίρεση υπερβολών και η βούληση επέκτασης εφαρμογών. Σήμερα όμως, η γνώση της Ι.Τ. περιορίζεται σε μικρό κύκλο ειδικών. Η διάχυσή της ευρύτερα γίνεται με ανακρίβειες και αιτιάζει σύγχυση. Εργαλείο για την διεύρυνση αυτής της γνώσης είναι η ένταξη της τέφρας σε Πρόγραμμα Σπουδών στα ΑΕΙ.

Λέξεις κλειδιά: ιπτάμενη τέφρα, διαχείριση παραπροϊόντων

FLY ASH: INDUSTRIAL WASTE OR BY-PRODUCT?

S. Itskos

Ptolemaida City Councillor

ABSTRACT: Fly Ash (F.A.) has been present for fifty years now in the areas where lignite-fired power plants operate. Undoubtedly F.A. has been treated as waste and -over the years- has proven to be a burden for the local society. All the factors that undermine its exploitation have been highlighted and all potential development has been undermined. The region has been charged with the presence of F.A., but the society has yet to benefit from it. Furthermore, the “producer” also falls short to objectively appreciate the potential for utilization of the product, despite all the available research data; until now it is being treated as waste. The future will show if it is understood that the material is a by-product of the producer’s production process, by demonstrating solid intent and by consistent management. On the other hand, the “user” has developed know how, has checked production costs and has increased competitiveness. Environmentally, this has also benefited the region where the “user” operates by reducing mineral extraction and energy consumption. The State has also benefited environmentally -nationwide- by reducing consumption of mineral resources and energy consumption, while national economy has -indirect- financial gains from the “user’s” revenue and also from reductions in investment for energy production. The recent National Standards Draft for extended use of (High Calcium) Fly Ash is a “step” for its further utilization. The displayed “competitions” between ash producers oblige the State to enforce that “step”, to implement it rather than to leave it “hanging”. And not only this; certain ashes -in a worldwide basis- are threatened with prohibition, a fact which makes it imperative to implement the “stepping” procedure. The overcoming of mutual reservations and the socialization of prospects will turn stepping into “galloping” (development) to the advantage of all: Society, State, Users. A prerequisite in this direction is the refutation of overstatements and the will to extend applications. However, today the knowledge for F.A. is confined to a small circle of specialists. Its diffusion is taking place inaccurately and causes confusion. A tool for the expansion of this knowledge is the incorporation of F.A. in University curriculum.

Keywords: fly ash, by-product management

Εδώ και τρεις γενιές η κοινωνία της περιοχής μας δραστηριοποιείται υπό την παρουσία της Τέφρας.

Έχουμε συνειδητοποιήσει τις επιπτώσεις αυτής της παρουσίας, σήμερα όμως διαθέτουμε και πολλά περισσότερα δεδομένα, για τις δυνατότητες αξιοποίησης αυτού του υλικού. Είμαστε έτοιμοι να κάνουμε τον απολογισμό της παρουσίας της Τέφρας.

Η ρυπαντική δράση της (λεγόμενης) Ιπτάμενης Τέφρας, ξεκίνησε από τα "βαφτίσια" της, ως Ιπτάμενης. "Ανάδοχός" της, οι Τεχνικοί. Σαυτούς χρεώνεται ο όρος, τον αποδέχθηκαν όμως όλοι, μη εξαιρουμένων των ερευνητών.

Ασφαλώς η Τέφρα δεν έχει...φτερά, επομένως δεν "ίπταται" !

Η παραγόμενη Τέφρα, στις εγκαταστάσεις καύσης της λιγνιτικής ηλεκτροπαραγωγής, συνοδεύει τα καυσαέρια, της ίδιας διαδικασίας, κατά την πορεία τους -μέσω της εγκατάστασης αποκονίωσης (Ηλεκτροστατικά Φίλτρα)- προς την έξοδό τους από την καμινάδα.

Το ποσοστό της Τέφρας, που διαφεύγει την κατακράτηση (μικρό, σε σύγχρονες εγκαταστάσεις αποκονίωσης) -και επιβαρύνει το περιβάλλον- συνιστά σωματίδια αιωρούμενα. Αιωρούμενα, στην ατμόσφαιρα, όσο επιτρέπουν οι φυσικοί νόμοι (αεροδυναμικής).

Η κατακρατούμενη (στα Η/Φ) Τέφρα ασφαλώς δεν είναι ιπτάμενη και -σε μεγάλο ποσοστό- ούτε αιωρούμενη. Μέρος αυτής είναι αυτό, που αφορά στις εφαρμογές της Τέφρας, η αξιοποιούμενη, που ευχής έργο θα είναι να μεγιστοποιηθεί. Η "αιωρούμενη" ατυχώς έχει βαφτίσει και την κατακρατούμενη, χρεώνοντας και σαυτήν τις εντυπώσεις, με αρνητικές επιπτώσεις, εξ αιτίας σύγχυσης, στις δυνατότητες εκμετάλλευσής της.

Η "αιωρούμενη" Τέφρα ασφαλώς επιβαρύνει περιβαλλοντικά και συνιστά ρύπο. Δικαιούται η κοινωνία μας να ενίσταται κατά τούτο και νομιμοποιείται να απαιτεί την τήρηση των περιβαλλοντικών όρων. Όμως, η οπτική εντύπωση της "αιωρούμενης" Τέφρας, κατέληξε να χαρακτηρίζει το υλικό, στο σύνολό του, και να παρεμποδίζει την δυναμική αξιοποίησης της Τέφρας.

Η "αιωρούμενη" (Τέφρά), με την βαρύτητα των εντυπώσεων, έλκει προβολείς και φλας (το "φως") της δημοσιότητας και καθίσταται "Μαύρη Τρύπα", για τις δυνατότητες αξιοποίησης της Τέφρας ! Ευελπιστούμε, ότι δεν θα παγιδέψει και τον...χρόνο, το μέλλον του τόπου.

Το "φως" της γνώσης, για τα περιβαλλοντικά, αλλά και τις δυνατότητες αξιοποίησής της Τέφρας, θα αποδώσει τα της αιωρούμενης στα περιβαλλοντικά (στις χρεώσεις από την παρουσία της), ενώ τα της αξιοποιήσιμης στα επωφελή (στις πιστώσεις, από την χρήση της).

Από άλλη πλευρά, η γνώση της Τέφρας περιορίζεται σε (μικρό) κύκλο ειδικών. Η διάχυση αυτής της γνώσης ευρύτερα γίνεται με ανακρίβειες, χωρίς να αποκλείονται υπερβολές, με αποτέλεσμα να προκαλείται σύγχυση. Η κινδυνολογία βρίσκει "ευήκοα ότα" και -μακροπρόθεσμα- κατέστησε την Τέφρα "δυνάστη" της περιοχής, υπονομεύοντας την αναπτυξιακή της προοπτική, και "χρεώνοντας" στο τόπο τις επιπτώσεις της Τέφρας, χωρίς να "πιστωθεί" τα οφέλη από την χρήση της.

Η διεύρυνση γνώσης της Τέφρας -η "κοινωνικοποίησή" της- θα αναιρέσει πολλές από τις υπερβολές, που προκάλεσαν κατά καιρούς αναστάτωση. Θα αδρανοποιηθεί η λαϊκίστικη κινδυνολογία, αλλά θα εξουδετερωθεί και σκοπούμενος "εφησυχασμός".

Για να γίνει αυτή η γνώση “κοινωνική”, είναι απαραίτητο η Τέφρα, να περιληφθεί σε Προγράμματα Σπουδών Α.Ε.Ι. Η περιοχή είναι ένα τεράστιο “ανοιχτό εργαστήριο”, τόσο σε περιβαλλοντολογικά, όσο και στις δυνατότητες περαιτέρω αξιοποίησης της Τέφρας, και όχι μόνον.

Η τοπική κοινωνία θα ωφεληθεί από μια τέτοια προοπτική, ως απολήπτης της παραγόμενης γνώσης, ενώ θα στηρίζει και την ανταγωνιστικότητα του Ιδρύματος, στο περιβάλλον της Ακαδημαϊκής του δραστηριότητας.

Η περιοχή φιλοξενεί το νεοσύστατο Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας με τμήματα που συγγενεύουν, στο γνωστικό τους αντικείμενο, με τα θέματα που άπτονται της Τέφρας (και εν γένει των Ορυκτών Πόρων), τόσο από πλευράς περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος, όσο και υπό το πρίσμα της αξιοποίησής της. Όμως και η Εγνατία μας έχει φέρει πιο κοντά στις έδρες όλων των Πανεπιστημίων.

Αναμφίβολα η Τέφρα, κατά το ποσοστό της που επιβαρύνει το περιβάλλον, συνιστά ρύπο. Στο ποσοστό της όμως, που βρίσκει πρόσβαση σε τεχνικές εφαρμογές, μπορεί να ασκήσει “απορρυπαντική” δράση. Η πρώτη όψη ίσως έχει υπερτονιστεί και έχει βρει κοινωνικό έρεισμα. Έχει τονιστεί υπέρβαρα, εις βάρος της δεύτερης, η οποία δεν προσέλκυσε το κοινωνικό ενδιαφέρον.

Ο ομιλών είναι ο τελευταίος, που θα απένειμε τα εύσημα στην Τέφρα, οφείλουμε όμως όλοι μας να αποδίδουμε την βαρύτητα που αρμόζει, γιατί η διόγκωση μιας άποψης είναι εξίσου επιζήμια με την υποβάθμισή της.

Είναι αυτονόητο ότι, όσο μεγαλύτερης εφαρμογής τύχει η Τέφρα, τόσο περιορίζεται η ποσότητα που προορίζεται για απόθεση, επομένως και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ επενδύοντας μέρος από τα οικονομικά οφέλη των εφαρμογών της Τέφρας σε αντιρρυπαντικές δράσεις, περιορίζονται και οι επιπτώσεις της ρυπαντικής παρουσίας της αιωρούμενης.

Παράλληλα βέβαια, η διεύρυνση του κύκλου εργασιών, παρακολουθείται και από κοινωνικά οφέλη, για παράδειγμα όσον αφορά στην απασχολιστικότητα, με τις θέσεις εργασίας που συνεπάγεται.

Ως κοινωνία, που φιλοξενούμε την δραστηριότητα, οφείλουμε να “απορρυσάνουμε” την φήμη μας. Το οφείλουμε στον αυτοσεβασμό μας και στα παιδιά μας.

Και ο ίδιος όμως, ο “Παραγωγός” της Τέφρας, η λιγνιτική ηλεκτροπαραγωγή, υπολείπεται σε αντικειμενική εκτίμηση των δυνατοτήτων, που συνεπάγεται η διεύρυνση χρήσης της Τέφρας. Εθελουφλεί στο ίδιο του όφελος, ενώ είναι γνώστης των δεδομένων. Υστερεί σε ενέργειες, για τον αποχαρακτηρισμό του υλικού από απόβλητο σε παραπροϊόν. Πρόσφατα υπήρξε ενθαρρυντική δήλωση σχετική, δια χειλέων (του πλέον) υψηλόβαθμου στελέχους, που προσανατολίζει σε εξορθολογισμό διαχείρισης του “παραπροϊόντος”. Το μέλλον θα δείξει την βούληση. Η υλοποίηση ασφαλώς θα βελτιώσει το “οικολογικό προφίλ” του Παραγωγού, ενώ θα προκύψουν οικονομικά οφέλη και για τον ίδιο.

Στον αντίποδα ο “Χρήστης” του υλικού. Με την χρήση του στην παραγωγική του διαδικασία -με αξιοποίηση της τεχνογνωσίας του- ελέγχει το κόστος της παραγωγής του και, ενισχύει την ανταγωνιστικότητά του. Ταυτόχρονα, η περιοχή όπου δραστηριοποιείται, ωφελείται περιβαλλοντικά, από τον περιορισμό εξορυκτικής δραστηριότητας για υλικά, τα οποία υποκαθιστά

η Τέφρα, και την απομείωση τοπικά των ενεργειακών απαιτήσεων, για την παραγωγή του προϊόντος του.

Παράλληλα η Πολιτεία, ωφελείται οικονομικά, έμμεσα από τον κύκλο εργασιών του Χρήστη, αλλά και την εξοικονόμηση επενδύσεων (για την παραγωγή ενέργειας και την εξόρυξη ορυκτών), ενώ προκύπτουν και αντίστοιχα περιβαλλοντικά οφέλη, ανά την Επικράτεια.

Στα πλαίσια της Επικράτειας, η συντήρηση φυσικών πόρων και η εξοικονόμηση ενέργειας, συνεπάγονται επωφελή απορρόφηση της Τέφρας σε οικονομική δραστηριότητα, υπό εναρμόνιση με το οικοσύστημα. Αυτό δεν είναι παρά ο ορισμός της "αειφορίας", όσο αιρετική και αν ηχεί αυτή η άποψη.

Και αυτά σε βάθος μερικών δεκαετιών, από την περίοδο εκδήλωσης της πρώτης ενεργειακής κρίσης.

Το ενεργειακό παραμένει έκτοτε στην επικαιρότητα, και απαιτεί διαχρονικά αδιάκοπη προσπάθεια, για τη διαχείρισή του.

Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση παραπροϊόντων στην βιομηχανική παραγωγική διαδικασία συντηρεί το ενδιαφέρον, σε βαθμό που, όχι απλά να θεωρείται ασυγχώρητη πολυτέλεια -η μη αξιοποίησή τους- αλλά συνιστά κατασπατάληση πόρων !

Η Τέφρα είναι ένα παραπροϊόν, βιομηχανικά αναβαθμισμένο. Ένα πλήθος ιδιοτήτων της, της πιστώνουν αυτό τον χαρακτηρισμό και της αναγνωρίζουν δυνατότητες, σε πολυποίκιλες εφαρμογές, ευρύτερων αυτών που γνωρίζει σήμερα.

Η οικονομική αποτίμηση, που θα προκύψει από την μεγιστοποίηση εκμετάλλευσης της Τέφρας, σε επίπεδο εθνικής οικονομίας, δεν την αποχαρκτηρίζει από "ρύπαντική" παράμετρο, σε τοπικό επίπεδο, αφού αυτή -δικαίως ή αδικώς- φέρει τον "σταυρό" των επιπτώσεων της λιγνιτικής ηλεκτροπαραγωγής.

Από την άλλη πλευρά, η "αποζημίωση" της τοπικής κοινωνίας, τόσο δικαιότερη θα είναι, όσο ευρύτερης αξιοποίησης τύχει η Τέφρα, και θα μπορούσε να υπολογίζει σε (άμεσα) οικονομικά οφέλη, αφής η ευρύτητα της (ποσοτικής) εφαρμογής της, την καθιέρωση (ορυκτό) πόρο, με αναγνώρισή της, από πλευράς Πολιτείας, ως ορυκτό. Αυτό βέβαια προϋποθέτει ότι, (αρμόδιες) υπηρεσίες θα πρέπει να απαγκιστρωθούν από παρωχημένους (τυπικούς) περιορισμούς, περασμένων δεκαετιών, προγενέστερων και της...ενεργειακής κρίσης ! "Δει, δη, πολιτικής βούλησης..."

Η Τέφρα, εκτός από τη δυναμική και το ενδιαφέρον, που παρουσιάζει στην Βιομηχανία Δομικών Έργων, εμπεριέχει συστατικά, για πολλά από τα οποία η απόληψη σήμερα είναι αντιοικονομική. Όμως, η εξάντληση φυσικών ορυκτών πόρων, η εξέλιξη της τεχνολογίας, η ζήτηση της αγοράς - και επομένως η διαμορφούμενη τιμή- καθιστούν, στο άμεσο (ή απώτερο) μέλλον, οικονομικά συμφέρουσα την εκμετάλλευση ορισμένων εξ αυτών.

Υπό την προοπτική αυτή, η διαχείριση της προς απόθεση Τέφρας -από πολλού- θα έπρεπε να γίνεται κατά τρόπο, που να επιτρέπει την προοπτική μελλοντικής εκμετάλλευσής της.

Στη διεθνή σκηνή ήδη εκδηλώνονται “διαγκωνισμοί” τεφροπαραγωγών, όσον αφορά στην προσβασιμότητα του προϊόντος τους στην αγορά. Και βέβαια αυτή, η αγορά, στην επιλεκτικότητά της νομιμοποιείται να απαιτεί τον “επιστημονικό μανδύα”.

Αυτή η πρακτική θα πρέπει να σταθεί σύμβουλος για την Πολιτεία, ώστε το ουσιαστικό βήμα, που έγινε με την Σύνταξη Εθνικών Προδιαγραφών, για Επέκταση Χρήσης της Ca-χου Τέφρας, να μη μείνει “μετέωρο”, αλλά να πραγματοποιηθεί. Και όχι μόνον. Οι επαπειλούμενοι αποκλεισμοί Τεφρών, στο διεθνές πλαίσιο, επιβάλλουν να γίνει “βηματισμός”.

Ο Δήμος Πτολεμαΐδος αναγνώρισε πρόσφατα το ουσιαστικό έργο της Επιτροπής, για την Σύνταξη των Προδιαγραφών της Τέφρας, τιμώντας τα μέλη της σε ειδική εκδήλωση. Αναγνωρίσαμε τις δυσκολίες του εγχειρήματος, αλλά και τις προοπτικές που διανοίγονται.

Εννοούμε να συνεισφέρουμε, ώστε ο βηματισμός, στην κατεύθυνση αυτή, να γίνει “καλπασμός”.

Καλπασμός ανάπτυξης, επωφελεία όλων :

- Πολιτείας,
- Παραγωγού,
- Χρηστών, αλλά και της
- Κοινωνίας, που “φιλοξενεί” την παραγωγή της Τέφρας.

Το δικαιούμεστε και θα επιδιώξουμε να νομιμοποιήσουμε το δικαίωμά μας αυτό.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΔΕΗ ΟΥΤΟΠΙΑ Η ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ;

Σ. Τσίμας, Α. Μουτσάτσου - Τσίμα

Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η Ελληνική τέφρα υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο (HCFA), μολονότι δεν εμπίπτει στις σχετικές Ευρωπαϊκές προδιαγραφές, μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητική απόδοση για το τελικό προϊόν όταν χρησιμοποιηθεί κατάλληλα. Υπάρχουν συγκεκριμένες τεχνολογίες και τεχνικές προς διαχείριση του συγκεκριμένου παραπροϊόντος, που αποσκοπούν κύρια στην υπερπήδηση των προβλημάτων που συνδέονται με τα εγγενή χαρακτηριστικά του. Οι σημαντικότερες που προτείνονται και αναλύονται στα πλαίσια της εργασίας είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα προεπιλογής της τέφρας, η αξιολόγηση του χονδρόκοκκου κλάσματος αυτής και η περαιτέρω άλεση ταυτόχρονα με μερική ενυδάτωση της. Ο διαχωρισμός του χονδρόκοκκου κλάσματος της ασβεστούχου τέφρας και η ενσωμάτωση του μετά από περαιτέρω άλεση σε συστήματα τσιμέντου και σκυροδέματος βελτιώνουν το τελικό προϊόν. Η αναβαθμισμένη απόδοση του εν λόγω κλάσματος αποδίδεται πρώτιστα στις διαφορές στην χημική τους σύσταση (σε σχέση με την αρχική τέφρα), πρώτιστα στο πλεόνασμα των ενεργών πυριτίου και αλούμινας, οι οποίοι είναι οι βασικοί εκφραστές της ποζολανικής του δράσης.

Λέξεις κλειδιά: ασβεστούχος τέφρα, σύνθετα τσιμέντα, ενεργό πυρίτιο, συντελεστής αποδοτικότητας

MANAGEMENT OF HELLENIC FLY ASHES

S. Tsimas, A. Moutsatsou-Tsima

School of Chemical Engineering, National Technical University of Athens

ABSTRACT: HCFA thought not in compliance with relating standards, can ensure excellent performance for the final product when properly used. There are some techniques in order to manage HCFA and overcome their difficulties associated with their nature. These techniques comprise their pre selection, the evaluation of the properties of their coarse fraction or finally their grinding with simultaneous hydration. The separation of the coarse fraction of HCFA and its addition after grinding in cements and concretes seems to be very advantageous. This superiority of the coarser fraction is attributed to the differences in the chemical composition of the samples, mostly to the excess of active silica and alumina which are the main carriers of the pozzolanic reactions.

Keywords: high-calcium fly ash, blended cement, reactive silica, efficiency factor

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι ερευνητικά αποδεδειγμένο και παγκοσμίως αποδεκτό ότι οι Ιπτάμενες τέφρες που προκύπτουν από την καύση ορυκτών ανθράκων διαφόρων γεωλογικών περιόδων έχουν θετική επίπτωση όταν συνεργάζονται με το σκυρόδεμα είτε ως ξεχωριστά υλικά προστιθέμενες στον αναμικτήρα είτε ως συστατικά στους προβλεπόμενους από τους κοινοτικούς ή Εθνικούς κανονισμούς τύπους τσιμέντων. Εκτός από την οικονομική διάσταση που έχει μια τέτοια προσθήκη, επιπλέον οι ιπτάμενες τέφρες:

- Βελτιώνουν σημαντικά πολλές ιδιότητες τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος
- Συντελούν σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας καθόσον αντικαθιστούν το κλίνκερ του τσιμέντου Πόρτλαντ το οποίο είναι ένα σημαντικά ενεργειακά αναβαθμισμένο υλικό
- Συντελούν σε σημαντική μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα.
- Συντελούν στην μείωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων που οφείλονται τόσο από την διακίνηση της Ιπτάμενης τέφρας όσο και από την απόθεση στον τόπο των ορυχείων των μη αξιοποιούμενων ποσοτήτων τεφρών

Με βάση αυτή τη θετική συνεισφορά των τεφρών, παρατηρείται τα τελευταία χρόνια μία συνεχής προσπάθεια σε παγκόσμια κλίμακα για την αύξηση του ποσοστού αξιοποίησης τόσο των ΙΤ όσο και των άλλων παραπροϊόντων από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι περισσότερο γνωστά ως Coal Combustion Products ή (CCPs). Ειδικότερα για την Ευρώπη και όσον αφορά στις τέφρες, το ποσοστό αξιοποίησης πλέον ανέρχεται στο 46% (ενώ στην Γερμανία και την Ολλανδία προσεγγίζει το 100%) γεγονός που σημαίνει ότι στην Ευρώπη από ένα σύνολο παραγομένων τεφρών της τάξης των 40-45 Mt αξιοποιούνται περίπου 18.2 Mt τεφρών. Τα αντίστοιχα Ελληνικά δεδομένα είναι: Παραγωγή 11.5-12 Mt και αξιοποίηση μόνο 1,1 Mt, το ποσοστό δηλαδή της αξιοποιούμενης τέφρας στην Ελλάδα είναι πολύ μικρό της τάξης του 10%. Τίθεται επομένως στο σημείο αυτό ένα καίριο ερώτημα.. Γιατί οι Ελληνικές ΙΤ, ενώ συμβάλλουν ουσιαστικά στο σύνολο των παραγομένων στην ΕΕ ιπταμένων τεφρών (~ 30%), έχουν πολύ μικρό ποσοστό αξιοποίησης (~ 6%)? Η απάντηση προκύπτει από συνδυασμός των τεσσάρων παρακάτω αναφερόμενων επιμέρους δεδομένων :

- Στη διαφορετική ποιότητα των προς καύση ανθράκων με αποτέλεσμα σε κάθε χώρα να παράγονται διαφορετικές ποσότητες τεφρών. Αυτό σημαίνει ότι χώρες με άνθρακες παλαιότερης γεωλογικής περιόδου που έχουν λίγα ανόργανα συστατικά, παράγουν μικρότερες ποσότητες τέφρας
- Στην διαφοροποιημένη σύσταση των τεφρών. Είναι γεγονός ότι οι τέφρες χαμηλού ποσοστού ασβεστίου, LCFA {CaO (<10%)} όπως είναι οι πυριτικές τέφρες οι ή οι τύπου F κατά ASTM καλύπτονται σε μεγαλύτερο ποσοστό από τα υπάρχοντα διεθνή πρότυπα (κυρίως το EN 450-1) και ως εκ τούτου έχουν μεγαλύτερα ποσοστά χρησιμοποίησης τους κυρίως σε πάσης φύσης δομικές εφαρμογές.
- Στην μη ύπαρξη εθνικών προδιαγραφών που να καλύπτουν μέρος των απορριπτόμενων κατά τύπους ιπταμένων τεφρών ή να προδιαγράφουν ειδικότερες χρήσεις αυτών.
- Στην μη ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης των παραγομένων τεφρών.

Στην Ελλάδα αυτή την στιγμή δεν ικανοποιείται καμία από τις ως άνω τέσσερις προϋποθέσεις που θα οδηγούσαν στην αύξηση του ποσοστού αξιοποίησης των τεφρών. Έτσι: ι) καίμε λιγνίτες με μεγάλο ποσοστό ανοργάνων που οδηγούν στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων τεφρών, ιι) οι τέφρες μας και των δύο πεδίων χαρακτηρίζονται ως τέφρες υψηλών ασβεστίων, άρα δεν καλύπτονται από τα υπάρχοντα πρότυπα, ιιι) δεν έχει υιοθετηθεί ακόμη από την Πολιτεία το

έτοιμο σχέδιο προδιαγραφών που θα οδηγούσε σε σημαντική αύξηση του εύρους των εφαρμογών της και iv) δεν υπάρχει σχέδιο διαχείρισης καίτοι είναι μελετημένα σε εργαστηριακή αλλά και σε κλίμακα εφαρμογών πολλά σχετικά εργαλεία. αντιμετώπισης των ιδιαιτεροτήτων των Ελληνικών ιπταμένων τεφρών.

Η παρούσα εισήγηση αντιμετωπίζει περισσότερο την τελευταία αυτή περίπτωση.

ΟΙ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΙΠΤΑΜΕΝΕΣ ΤΕΦΡΕΣ

Οι ετησίως παραγόμενες ποσότητες Ελληνικών CCPs παρουσιάζονται στον πίνακα 1 όπου και φαίνεται ότι οι Ιπτάμενες τέφρες εκτιμώνται σε 11.5-12 εκατ. τόνους από τους οποίους το μεγαλύτερο ποσοστό (>80%), προέρχονται από την περιοχή μεταξύ Κοζάνης και Πτολεμαΐδας, όπου συγκεντρώνονται και οι περισσότεροι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί της ΔΕΗ.

Πίνακας 1. Ετήσια παραγωγή (t) τεφρών και FGD Gypsum από τους ΑΗΣ της ΔΕΗ

ΑΗΣ	Ιπτάμενες τέφρες	Υγρές τέφρες	FGD Gypsum
Πτολεμαΐδα	1.100.000	35.000	
Καρδιά	2.750.000	87.000	
Αμύνταιο-Φιλώτας	1.700.000	260.000	
Αγ. Δημήτριος	3.700.000	200.000	
Φλώρινα	720.000	9.000	280.000
Σύνολο Β. Πεδίου	9.970.000	591.000	
Μεγαλόπολη	2.000.000	500.000	800.000
ΣΥΝΟΛΟ	11.970.000	1.091.000	1.080.000

Όπως αναφέρθηκε από τις ποσότητες αυτές των ιπταμένων τεφρών αξιοποιείται από την τσιμεντοβιομηχανία ένα ποσοστό της τάξης του 10%, ενώ οι μη αξιοποιούμενες ποσότητες (δηλαδή στην ουσία το 90% περίπου), οδηγούνται με ταινιόδρομους στις αποθέσεις των λιγνιτωρυχείων και κατά μία εκδοχή συμβάλλουν με τον τρόπο αυτό στη σταθεροποίηση των πρανών και στην πλήρωση των κενών που δημιουργούνται από την εξόρυξη του λιγνίτη, ενώ κατά μία άλλη εκδοχή επιβαρύνουν το ήδη υποβαθμισμένο περιβάλλον των περιοχών με μία ακόμα εστία ρύπανσης. Επιπλέον το κόστος μεταφοράς και απόθεσης της τέφρας δεν είναι αμελητέο και όταν αυτό γίνεται με φορτηγά φθάνει το 1€/τόνο.

Το ερώτημα που τίθεται επιτακτικά είναι:

Πως μπορεί να αυξηθεί το πολύ μικρό αυτό ποσοστό?

Για να απαντηθεί αυτό και να προταθεί ένα αποτελεσματικό σύστημα διαχείρισης των Ελληνικών ιπταμένων τεφρών θα πρέπει σε πρώτη φάση να αναλυθούν οι ιδιαιτερότητες τους. Σε προηγούμενες μελέτες είχαν επισημανθεί τα προβλήματα που εμφανίζουν οι Ελληνικές Τέφρες και είχαν προταθεί και εφαρμοσθεί επιτυχώς, σε κλίμακα έργου, τρόποι αντιμετώπισης των. Σε συνοπτική μορφή τα προβλήματα αυτά, τα οποία αυτομάτως θέτουν τις Ελληνικές τέφρες εκτός των ισχυουσών Ευρωπαϊκών προδιαγραφών, έχουν ως εξής:

Οι υψηλές τιμές οξειδίου του ασβεστίου. Είναι χωρίς αμφιβολία το σημαντικότερο τους πρόβλημα που οδηγεί στο να υπαχθούν στην κατηγορία των HCFA και τις θέτει εκτός

προδιαγραφών του ισχύοντος Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 450-1, καθόσον οι υψηλές τιμές συνολικού οξειδίου του ασβεστίου συνεπάγονται αντίστοιχα υψηλές τιμές κυρίως του ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου (CaO_f) αλλά και του δραστικού οξειδίου του ασβεστίου $\text{CaO}_{\text{react}}$

Ως ελεύθερο οξείδιο του ασβεστίου θεωρείται το κλάσμα εκείνο του συνολικού οξειδίου του ασβεστίου που δεν είναι ενωμένο με κάποιο άλλο οξείδιο στην τέφρα. Αυτό αποτελεί αποφασιστικό παράγοντα για την καταλληλότητα ή μη μιας τέφρας καθόσον η ενυδάτωσή του εκτός από προβλήματα διογκώσεων, επιφέρει και σημαντικές θερμοκρασιακές αυξήσεις που είναι και ανεπιθύμητες. Οι υψηλές τιμές ελεύθερου οξειδίου του ασβεστίου αποτελούν πρόβλημα περισσότερο για τις τέφρες Πτολεμαΐδας, ενώ οι ΙΤΜ εμφανίζουν σε μικρότερη έκταση ανάλογο πρόβλημα.

Η ανομοιογένεια της ακατέργαστης τέφρας. Είναι γεγονός ότι οι τέφρες ως παραπροϊόντα μιας βασικής διεργασίας όπως είναι η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος έχουν ως εγγενή τους ιδιότητα την ανομοιογένεια τόσο ως προς την χημική, όσο και ως προς την ορυκτολογική τους σύσταση, με άμεση επίπτωση την διαφοροποίηση στην εκδήλωση των ιδιοτήτων τους ως δομικών υλικών. Η ανομοιογένεια αυτή σχετίζεται με παράγοντες που αποδίδονται στην προέλευση του λιγνίτη, με παράγοντες που αποδίδονται στις συνθήκες καύσης και με παράγοντες που σχετίζονται με τα διατιθέμενα μέσα συλλογής της. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται το ίδιο έντονο στις τέφρες και των δύο πεδίων (Βόρειο και Νότιο).

Η ανάγκη για συμπληρωματική άλεση. Η ανάγκη για συμπληρωματική, αλλά όχι εξαντλητική, άλεση πηγάζει από το γεγονός ότι οι τέφρες εκδηλώνουν τις ποζολανικές αλλά και τις υδραυλικές ιδιότητές τους όταν είναι μικρότερες των $45\mu\text{m}$. Κάτω από αυτό το μέγεθος συγκεντρώνεται το δραστικό τους κλάσμα, ενώ στο χονδρόκοκκο υλικό συγκεντρώνεται ο άκαυστος άνθρακας του οποίου το ποσοστό πρέπει επίσης να ελέγχεται. Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι οι Ελληνικές τέφρες δεν έχουν πρόβλημα άκαυστου άνθρακα και όλες εμπίπτουν μέσα στις απαιτήσεις που θέτουν οι προδιαγραφές για την απώλεια πύρωσης. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται περισσότερο έντονο στις τέφρες Μεγαλόπολης που παρουσιάζονται πιο χονδρόκοκκες, αλλά και οι τέφρες Πτολεμαΐδας απαιτούν συμπληρωματική άλεση.

Οι ενίοτε εμφανιζόμενες υψηλές τιμές θεικών. Το υψηλό ποσοστό θεικών (SO_3) που κατά καιρούς εμφανίζεται, είναι άμεσα συνυφασμένο τόσο με την προέλευση των λιγνιτών, όσο και με τις συνθήκες καύσης καθόσον δεσμεύεται με το CaO . Τα θειικά πρέπει να ελέγχονται καθόσον, άνω κάποιου οριακού ποσοστού, έχουν αντίστοιχη με αυτή στο τσιμέντο δυσμενή επίπτωση. Οι ΙΤ ανάλογα με τον σταθμό στον οποίο παράγονται, εμφανίζουν σημαντική διαφοροποίηση όσον αφορά τον συγκεκριμένο παράγοντα. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τον ΑΗΣ Μεγαλόπολης (πίνακας 3) οι τέφρες που προκύπτουν στον ΑΗΣ Β εμφανίζουν κατά καιρούς ιδιαίτερα αυξημένα ποσοστά θεικών, γεγονός που καθιστά την αξιοποίηση τους προβληματική έως αδύνατη. Αντίθετα, στον ΑΗΣ Α, τα θειικά των τεφρών περιορίζονται εντός των ορίων του EN 450-1 ($<3\%$). Στην Πτολεμαΐδα εμφανίζονται κατά περιόδους υψηλές τιμές γεγονός που καθιστά επιτακτική την προεπιλογή των τεφρών για την οποία θα αναφερθούμε στην συνέχεια (§ 1.5.2).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι Ελληνικές Ιπτάμενες τέφρες δεν εμφανίζουν το πρόβλημα της αυξημένης απώλειας πύρωσης που εμφανίζεται στις περισσότερες Ευρωπαϊκές τέφρες.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΠΤΑΜΕΝΩΝ ΤΕΦΡΩΝ

Για άρση των προβλημάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως και με γνώμονα την αύξηση του ποσοστού αξιοποίησης των τεφρών είναι απαραίτητη η θέσπιση προδιαγραφών για τις Ελληνικές υψηλού ασβεστίου τέφρες. Με εφελκτήριο τις προδιαγραφές αυτές γίνεται ανάλυση στην συνέχεια των υπαρχουσών τεχνικών (εργαλεία) οι οποίες θα συντείνουν στην ορθολογικότερη διαχείριση των τεφρών ούτως ώστε να ενταχθούν είτε στις κατηγορίες που προβλέπονται στο Ελληνικό Σχέδιο προτύπου είτε ακόμη να συμμορφωθούν με το EN 450-1. Τα εργαλεία αυτά είναι τα εξής:

- Η προεπιλογή των τεφρών
- Η άλεση με την ταυτόχρονη μερική ενυδάτωση των τεφρών
- Η αξιοποίηση των μεγαλύτερου μεγέθους κόκκων των τεφρών
- Η επιλεκτική μερική αξιοποίηση τεφρών με υψηλά θειικά στην θέση της φυσικής γύψου

Με ένα συνδυασμό των ως άνω εργαλείων είναι δυνατό να μειωθεί σημαντικά το ποσοστό των απορριπτόμενων ιπταμένων τεφρών.

Αναλυτικά τα εργαλεία αυτά έχουν ως εξής:

Η προεπιλογή των τεφρών

Είναι το πρώτο βήμα μίας ολοκληρωμένης αντιμετώπισης τους για οποιαδήποτε εφαρμογή τους και ιδιαίτερα για αυτές στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα. Άμεσος στόχος τέτοιων συστημάτων προεπιλογής είναι να εντοπισθούν και να απομακρυνθούν ποιότητες τεφρών που έχουν είτε υψηλό ελεύθερο CaO είτε υψηλές τιμές SO₃. Με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε κατά την διάρκεια κατασκευής του φράγματος η προεπιλογή στηρίζεται σε τρεις διακριτές ενέργειες: 1) εγκατάσταση συστημάτων συνεχούς δειγματοληψίας σε προεπιλεγέντα σιλό αποθήκευσης τέφρας, 2) προσδιορισμό με σύγχρονες αναλυτικές τεχνικές των περιεχομένων ελCaO και SO₃ και 3) συλλογή και ανάμειξη των κατάλληλων ποιοτήτων τεφρών. Για το σύνολο αυτών των τριών ενεργειών υπάρχει τόσο η εμπειρία, όσο και ο εξοπλισμός που συνίσταται:

- ι) από τα συστήματα αυτόματης παραλαβής, ανά τακτά χρονικά διαστήματα τέφρας (πχ κάθε δύο ώρες), από την τροφοδοσία των σιλό αποθήκευσης της (κν. κλέφτες)
- ii) από τα, υπάρχοντα στο εργαστήριο της μονάδας άλεσης-κατεργασίας τέφρας στην Πτολεμαίδα, αναλυτικά όργανα προσδιορισμού ελCaO και SO₃ και
- iii) από τα 6 σιλό των 500t το καθένα, που ευρίσκονται στην Πλατανόβρυση και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν με μεγάλη επιτυχία για την επιπλέον ανάμειξη της τέφρας πριν την εφαρμογή της στο μίγμα των υλικών του φράγματος. Τα σιλό αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση της τέφρας που θα χρησιμοποιηθεί στις ειδικές χρήσεις.

Με την προεπιλογή επιτυγχάνεται η συγκέντρωση και φύλαξη των κατάλληλων ποιοτήτων τεφρών διότι, όπως προαναφέρθηκε, χαρακτηριστική ιδιότητα των τεφρών είναι η ανομοιογένεια. Όταν λοιπόν, μέσα από την διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως, διαπιστωθεί ότι το σιλό της τέφρας μίας μονάδας ενός ΑΗΣ τροφοδοτείται με «καλής» ποιότητας τέφρα, αυτή συγκεντρώνεται στα 6 σιλό διαχείρισης της τέφρας και είτε συντροφοδοτείται για μία χρήση με μία άλλη, ήσσονος ποιότητας τέφρα, είτε αναμιγνύεται περαιτέρω δεδομένης της δυνατότητας ομοιογένειας που έχουν τα 6 αυτά σιλό.

Η άλεση με την ταυτόχρονη μερική ενυδάτωση των τεφρών

Με το «εργαλείο» αυτό αντιμετωπίζεται τόσο το πρόβλημα της απαίτησης σε αυξημένη λεπτότητα των τεφρών, όσο και αυτό της ανάγκης για μείωση του ελCaO αυτών. Το υπάρχον συγκρότημα άλεσης κατεργασίας τέφρας που κατασκευάστηκε για αυτό το σκοπό σε χώρο αμέσως πίσω από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας απετέλεσε και αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή εφαρμογή της τέφρας Πτολεμαΐδας, ως βασικό δομικό υλικό για την κατασκευή του φράγματος της Πλατανόβρυσης. Τα κατασκευαστικά του στοιχεία και λεπτομέρειες από τον τρόπο λειτουργίας του έχουν αναφερθεί σε μία σειρά σχετικές δημοσιεύσεις. Ο μύλος καθόλο το διάστημα της 19μηνιας παραγωγής της τέφρας ανταποκρίθηκε με επιτυχία χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα και η παραγωγή του για τις απαιτήσεις που είχε θέσει η ΔΕΗ για το φράγμα ήταν περί τους 20-21 t/h. Είναι προφανές ότι:

- ι) ο μύλος μπορεί να ανταποκριθεί σε οποιαδήποτε διαφοροποίηση της κοκκομετρίας της τροφοδοσίας στα πλαίσια πάντοτε που κινούνται οι κοκκομετρίες των τεφρών
- ιι) έχει ευελιξία να δώσει λεπτότερο ή χονδρότερο προϊόν με αντίστοιχη μεταβολή της παραγωγής και
- ιιι) το συγκρότημα έχει την δυνατότητα να λειτουργήσει με ή χωρίς τον ψεκασμό του ανάλογα με το εάν επιδιώκεται ή όχι μείωση του ελ CaO. Τέλος με τροποποίηση της κοκκομετρίας των αλεστικών σωμάτων ο μύλος μπορεί να ανταποκριθεί και σε αλέσεις άλλων, εκτός της τέφρας, υλικών.

Η αξιοποίηση των μεγαλύτερου μεγέθους κόκκων των τεφρών

Αποτελεί μία νέα και φθηνή προτεινόμενη αντιμετώπιση του προβλήματος της μείωσης των απορριπτόμενων ποσοτήτων ΙΤ και στοχεύει στην αξιοποίηση κοκκομετρικών κλασμάτων τεφρών μέσω της μείωσης τόσο του ελ CaO όσο και των θεικών. Ενώ δηλαδή μία τέφρα στο σύνολό της χαρακτηρίζεται ως ακατάλληλη, κάποια κοκκομετρικά της κλάσματα και στην συγκεκριμένη περίπτωση τα χονδρόκοκκα από αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν. Αυτή η παρατήρηση στηρίζεται στο γεγονός ότι τα χονδρόκοκκα κλάσματα περιέχουν περισσότερο άμορφο πυρίτιο (που είναι ο κύριος φορέας εκδήλωσης των ποζολανικών αντιδράσεων) από τα λεπτόκοκκα.. Εάν λοιπόν με κάποια διάταξη αεροδιαχωρισμού απομακρυνθούν οι μικρότεροι των 45μm κόκκοι, το χονδρόκοκκο κλάσμα που απομένει (50-60% του συνολικού) μετά την άλεση του είναι δυνατό να αξιοποιηθεί. Αυτά παρουσιάζονται και στον πίνακα 2 όπου φαίνεται ότι δεν υπάρχει πρόβλημα αύξησης της ΑΠ στα χονδρόκοκκα κλάσματα σε τιμές εκτός των τιθέμενων ορίων.

Η επιλεκτική μερική αξιοποίηση τεφρών με υψηλά θειικά στην θέση της φυσικής γύψου

Η δυνατότητα αυτή προέρχεται από τελευταίες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας του ΕΜΠ και συντείνει στο να αξιοποιηθούν εκείνες οι τέφρες που διαθέτουν υψηλά θειικά τα οποία αυτομάτως θα τις έθεταν εκτός των προδιαγραφών. Σύμφωνα λοιπόν με την εμπειρία μας είναι δυνατό να παρασκευασθούν απολύτως αποδεκτά σύνθετα τσιμέντα με αντικατάσταση 20-30% κ.β. κλίνκερ από υψηλών θεικών ($\text{SO}_3 = 6.7\%$), ιπτάμενη τέφρα η οποία στην προκειμένη περίπτωση εξυπηρετεί και ως ποζολάνη και ως φορέας θεικού ασβεστίου. Τόσο οι χρόνοι πήξης όσο και οι αντοχές παρουσίασαν τιμές απολύτως συγκρίσιμες με αυτές του δείγματος αναφοράς (τσιμέντο με γύψο και χωρίς τέφρα).

Πίνακας 2 Χημική σύσταση και κύρια φυσικά χαρακτηριστικά
ΙΤΠ και κοκκομετρικών της κλασμάτων

	ΙΤΠ	Χονδρόκοκκο	Λεπτόκοκκο
CaO	29.79	21.02	33.02
CaO _f	4.05	2.36	4.45
CaO _{re} ^a	25.13	16.35	27.43
SiO ₂	36.92	42.79	33.50
SiO _{2re} ^a	29.13	32.46	26.49
Al ₂ O ₃	13.50	14.92	11.80
Fe ₂ O ₃	7.06	5.82	5.70
MgO	2.69	3.32	3.43
SO ₃	5.10	3.09	8.79
Na ₂ O	0.92	0.74	0.71
K ₂ O	0.50	0.56	0.61
LOI	4.36	4.66	4.01
γ_s^d	78.90	75.86	79.07
IR (%) [*]	14.52	15.69	10.40
Glass content. S ^b (%)	85.48	84.31	89.60
Blaine Fineness (cm ² /g)	5.450	5.420	5.250
Specific Gravity	2.80	2.92	2.78

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα προηγούμενα είναι σαφές ότι τα προβλήματα που εμφανίζουν οι Υψηλού ασβεστίου Ελληνικές Ιπτάμενες τέφρες είναι σε μεγάλο βαθμό αντιμετωπίσιμα.. Μέσα από δοκιμασμένες και καθόλου δαπανηρές διεργασίες είναι δυνατό να αξιοποιηθεί σημαντικά μεγαλύτερο ποσοστό τεφρών που μπορεί να φθάσει έως και διπλασιασμός της αξιοποιούμενης σήμερα ποσότητας τέφρας.

Είναι ουτοπικό να ισχυρισθεί κανείς ότι μπορεί να αξιοποιηθεί το σύνολο των τεφρών και όπως φαίνεται είναι αδύνατον να παύσουν να αποτίθενται τέφρες όπως γίνεται σήμερα. Οι ενέργειες όμως που στοχεύουν στην μείωση των ποσοτήτων αυτών με την παράλληλη αύξηση του ποσοστού των χρήσεων των ιπταμένων τεφρών, δείχνουν να αποτελούν ένα απόλυτα ρεαλιστικό στόχο. Ο διαφαινόμενος τουλάχιστον διπλασιασμός της ποσότητας της αξιοποιούμενης τέφρας, μόνο από την χρήση της ως δομικό υλικό (χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι εφαρμογές της σε έργα οδοποιίας) εκτιμάται ότι πρέπει να αποτελέσει κίνητρο για την ΔΕΗ η οποία πρέπει να στραφεί για την προώθηση των χρήσεων της τέφρας με την αξιοποίηση των εργαλείων διαχείρισης που εκτέθηκαν στην εργασία.

ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΗΣ ΣΚΩΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΤΙΟΛΙΣΘΗΡΩΝ ΨΥΧΡΩΝ ΛΕΠΤΟΤΑΠΗΤΩΝ

Ν.Οικονόμου

Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

Π. Εσκίογλου

Εργαστήριο Μηχανικών Επιστημών και Τοπογραφίας, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Α.Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία παρουσιάζεται η χρήση μεταλλουργικής σκωρίας ηλεκτρικού κλιβάνου στην κατασκευή αντιολισθηρών ψυχρών λεπτοτάπητων (skid resistant microsurfacing). Περιγράφονται τα υλικά, ο σχεδιασμός του μίγματος για την εφαρμογή των ειδικών αυτών λεπτοτάπητων καθώς και οι διάφοροι έλεγχοι που αφορούν τις δοκιμασίες της σύνθεσης του μίγματος. Προτείνονται οι κατάλληλες συνθέσεις για τους διάφορους τύπους μιγμάτων αντιολισθηρών ψυχρών λεπτοτάπητων με τη χρήση σκωρίας στην οδοποιία και σε τάπητες αεροδρομίων.

Λέξεις κλειδιά: μεταλλουργική σκωρία, ψυχροί λεπτοτάπητες, αντιολισθηρά οδοστρώματα

USE OF FURNACE STEEL SLAG IN CONSTRUCTION OF SKID RESISTANT MICROSURFACING

N. Oikonomou

Laboratory of Building Materials, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54124, Thessaloniki

P. Escioglou

Laboratory of Mechanical Sciences and Topography, Department of Forestry and Physical Environment, Aristotle University of Thessaloniki

ABSTRACT: The paper presents the use of furnace steel slag in construction of skid resistant microsurfacing. Materials, mixture design for the application of such thin layers as well as their various tests are presented. Suitable mixtures design is proposed for different types of microsurfacing for road pavements and airport runways.

Keywords: furnace steel slag, microsurfacing, skid resistant pavements

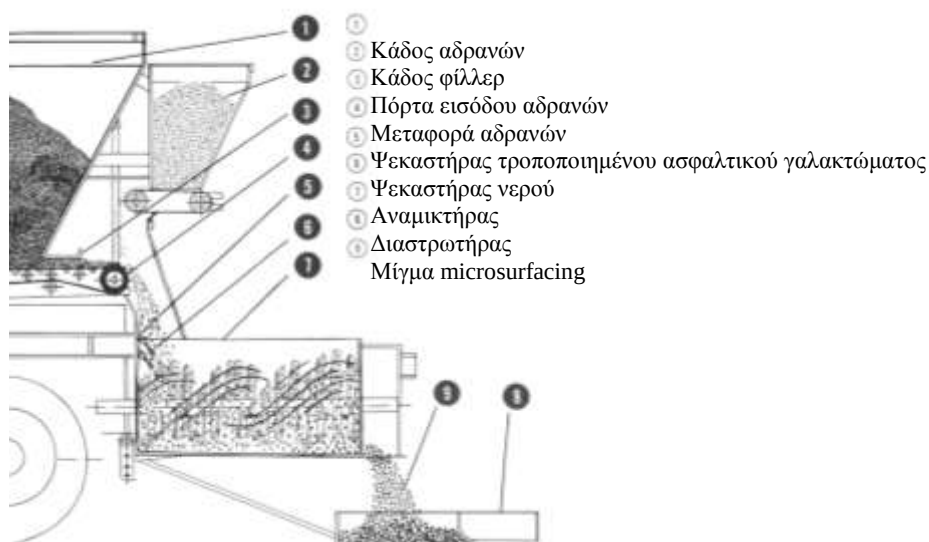
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της αυξανόμενης ζήτησης σκληρών αδρανών υλικών σε συνδυασμό με τις ελάχιστες πηγές τους αλλά και το υψηλό κόστος παραγωγής τους έχει οδηγήσει στη χρήση βιομηχανικών παραπροϊόντων σε αντικατάστασή τους. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις εφαρμογής επιφανειακών στρώσεων σε δρόμους αστικούς ή εθνικής οδοποιίας και σε διαδρόμους αεροδρομίων το πρόβλημα ανεύρεσης πηγών σκληρών αδρανών είναι επιτακτικό.

Η χρήση της μεταλλουργικής σκωρίας στην οδοποιία δεν είναι καινούργια. Ολόσωμοι τάπητες με τη χρήση σκωρίας έχουν κατασκευαστεί σε διάφορα σημεία των ελληνικών αυτοκινητοδρόμων (ΠΑΘΕ, ΑΤΤΙΚΗ ΟΔΟΣ). Πρόσφατα η σκωρία έχει χρησιμοποιηθεί σε μερική ή και πλήρη αντικατάσταση των αδρανών στην εφαρμογή αντιολισθηρών ψυχρών ασφαλτοταπήτων (microsurfacing).

Στην εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή microsurfacing με τη χρήση μεταλλουργικής σκωρίας που παράγεται βιομηχανικά από την εταιρία του ομίλου ΣΙΔΕΝΟΡ(ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.).

Η μέθοδος microsurfacing αναφέρεται στην εφαρμογή ενός ψυχρού ασφαλτομίγματος με συστατικά τροποποιημένο πολυμερές ασφαλτικό γαλάκτωμα, αδρανή, φίλλερ, νερό και κάποια πρόσμικτα. Το ειδικό αυτό ψυχρό ασφαλτόμικτο με τις κατάλληλες αναλογίες των συστατικών του αναμιγνύεται και διαστρώνεται στην υπάρχουσα επιφάνεια εν κινήσει(σχήμα 1). Το όλο σύστημα μπορεί να επιτρέψει την κυκλοφορία ύστερα από πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες(20-60 λεπτά της ώρας).



Σχήμα 1: Ανάμιξη και διάστρωση ψυχρού ασφαλτομίγματος

Τα μίγματα microsurfacing(ISSA, 2001 Recommended Performance) θεωρούνται εξέλιξη των μιγμάτων slurry seal(ASTM D 3910-90) λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων τους εξαιτίας της προσθήκης πολυμερών στο ασφαλτικό γαλάκτωμα(AASHTO M 316-96).

Πίνακας 1: Μέση σύσταση μεταλλουργικής σκωρίας (ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.)

	FeO	CaO	SiO2	MnO	AL2O3	MgO	Cr2O3	Na2O	P2O5	
AVERAGE	36,49%	32,602%	14,162%	6,316%	5,850%	1,875%	1,288%	0,490%	0,378%	
	TiO2	SO3	Ba	CL	V2O5	K2O	WO3	CuO	ZnO	CoO
AVERAGE	0,369%	0,402%	0,154%	0,039%	0,078%	0,091%	0,034%	0,039%	0,087%	0,013%

Η μέθοδος microsurfacing έχει αναδειχθεί ως μια από τις πλέον οικονομικές μεθόδους συντήρησης επιφανειών οδοστρώματων και ταπήτων αεροδρομίων επειδή έχει πολλά πλεονεκτήματα:

- παρέχει αντικατάσταση της φθαρμένης επιφάνειας προσδίδοντας ομοιόμορφο μαύρο χρώμα
- εφαρμόζεται ταχύτατα χωρίς μεγάλη διακοπή της κυκλοφορίας
- προσδίδει επιφάνεια υψηλής αντιολισθηρότητας
- Το όλο σύστημα είναι περιβαλλοντικά φιλικό επειδή εφαρμόζεται σε κανονική θερμοκρασία, απαιτείται μόνο νερό και ως λεπτοτόπηση δεν απαιτώνται υψηλά ποσά ενέργειας και πρώτων υλών(άσφαλτος, αδρανή) ενώ με την χρήση της σκωρίας γίνεται ακόμα πιο οικολογικό.

Προσθήκη μόνο μέρους σκωρίας σε αντικατάσταση αδρανών σε μίγματα slurry seal έχει προταθεί από άλλους ερευνητές(Khan M.I.,1998) αλλά όχι σε μίγματα microsurfacing. Στην εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή microsurfacing με την πλήρη αντικατάσταση των αδρανών με σκωρία και συνεπώς την κατασκευή αντιολισθηρών λεπτοτόπων με μεγάλο οικολογικό ενδιαφέρον λόγω της χρήσης βιομηχανικού παραπροϊόντος.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Υλικά

- Αδρανές

Ως αδρανές χρησιμοποιήθηκε σκωρία της εταιρίας ΑΕΙΦΟΡΟΥ Α.Ε. Η σκωρία είναι βιομηχανικό παραπροϊόν- τεχνητό πέτρωμα του οποίου η χημική σύνθεση είναι ανάλογη με πολλά πετρώματα. Μια μέση σύσταση της σκωρίας(έτος 2004)περιγράφεται στον Πίνακα 1(ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.)

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά σκωρίας για microsurfacing

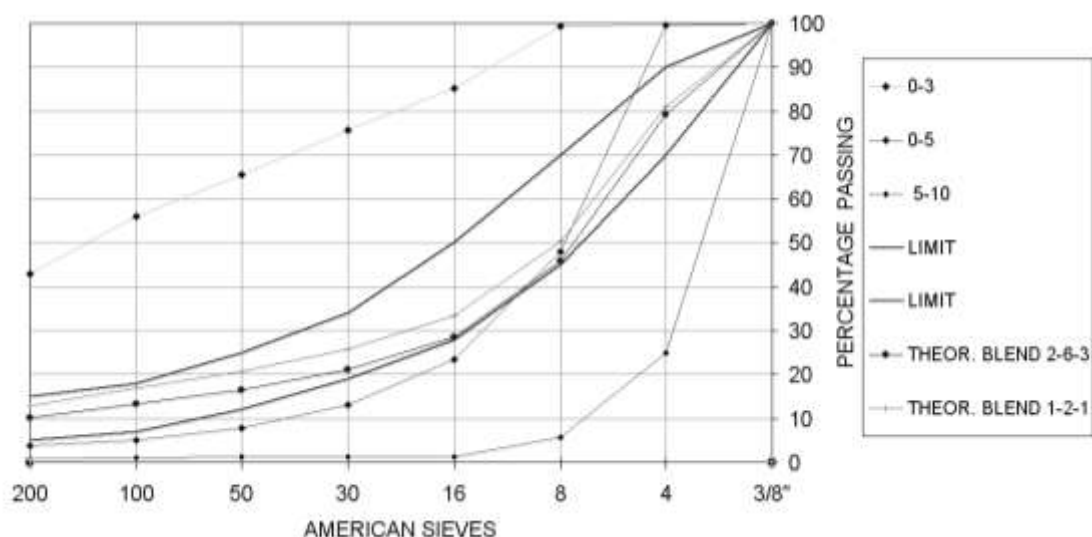
Δοκιμή	Μέθοδος	Αποτελέσματα
Αντοχή σε τριβή και κρούση (L.A.)	ASTM C-131	15
Δείκτης αντίστασης στίλβωσης (PSV)	BS 812	64
Δείκτης αντίστασης σε απότριψη (AAV)	BS 812	3
Υγεία (θειικά άλατα)	ASTM C-88	0.8

Πίνακας 3: Κοκκομετρικές αναλύσεις σκωριών(ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.),
μυγμάτων τους και όρια microsurfacing τύπου ΙΙΙ.

ΣΚΩΡΙΕΣ								
SIEVE SIZE TYPE III								
					Γράφημα 1		Γράφημα 2	
					1-2-1		2-6-3	
IN.	mm	LIMITS A	LIMITS D	0-3	0-5	5-10	Theor.Bl.	Theor.Bl.
3/8						100.0		
"	9.50	100.00	100.00	100.00	100.00	0	100.00	100.00
4	4.75	70.00	90.00	99.60	99.60	24.90	80.93	79.23
8	2.36	45.00	70.00	99.40	48.00	5.70	50.28	45.81
16	1.18	28.00	50.00	85.20	23.40	1.30	33.33	28.61
30	0.60	19.00	34.00	75.70	13.10	1.20	25.78	21.24
50	0.30	12.00	25.00	65.50	7.90	1.20	20.63	16.55
100	0.15	7.00	18.00	56.00	5.10	1.10	16.83	13.26
200	0.08	5.00	15.00	43.00	3.80	0.90	12.88	10.14

Οι διάφορες δοκιμές της σκωρίας για χρήση στην οδοποιία από διάφορες εργαστηριακές δοκιμές επιβεβαιώνουν το χαρακτηριστικό της σκωρίας ως σκληρό αδρανές κατάλληλο για χρήση για αντισιδηρές επιφάνειες(ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε.). Πιο συγκεκριμένα η σκωρία που χρησιμοποιήθηκε στα μίγματα microsurfacing είχε τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 2.

Οι κοκκομετρικές αναλύσεις των σκωριών ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε. που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και των μυγμάτων τους (μέρη 1-2-1 και 2-6-3) φαίνονται στον Πίνακα 3 και στο διάγραμμα 2. Επίσης στον Πίνακα 3 φαίνονται και τα όρια για microsurfacing τύπου ΙΙΙ. Το μίγμα των αδρανών στις δοκιμές ισοδύναμου άμμου και μπλε του μεθυλενίου έδωσε τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 4.



Διάγραμμα 2 : Κοκκομετρικές αναλύσεις σκωριών, μυγμάτων τους και ορίων microsurfacing

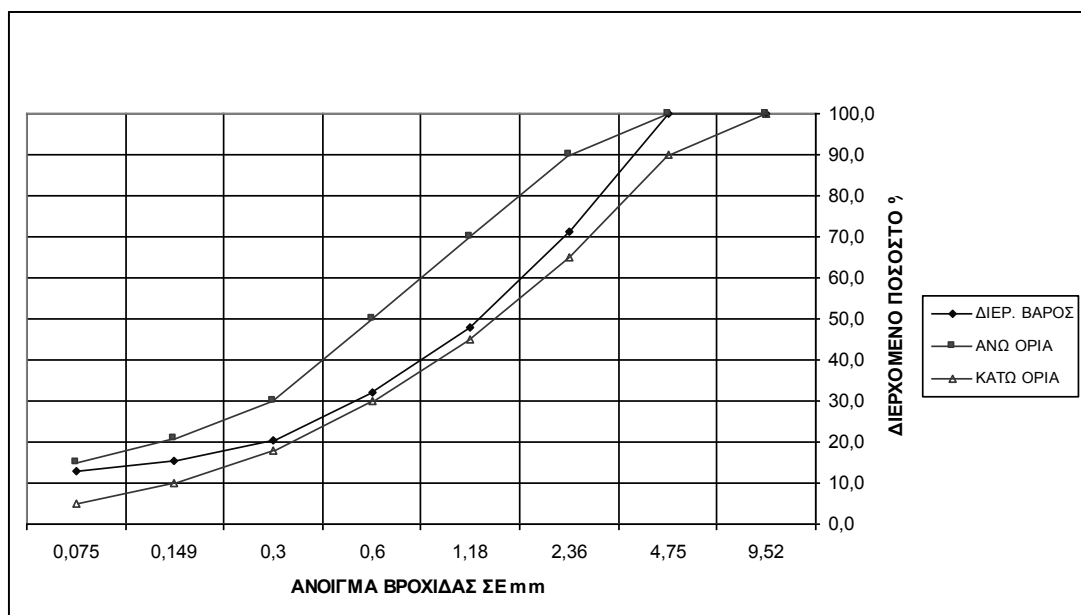
Πίνακας 4: Δοκιμές SE και MB στα μίγματα σκωρίας

Δοκιμές	Μέθοδος	Αποτελέσματα
Ισοδύναμο άμμου (SE)	ASTM D 2419	90
Δοκιμή μπλέ του μεθυλενίου(MB)	ISSA TB 145	0.2mg/g

Πίνακας 5: Κοκκομετρική ανάλυση μίγματος microsurfacing τύπου II

SIEVE SIZE	CUM. WT. RET'D	CUM. WT PASSING	CUM. WT PASSING	UPPER LIMIT REQUIREMENT	LOWER LIMIT REQUIREMENT
ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ	ΣΥΓΚΡΑΤ. ΒΑΡΟΣ	ΔΙΕΡΧΟΜ. ΒΑΡΟΣ	ΔΙΕΡΧΟΜ ΒΑΡΟΣ	ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΑΝΩ ΟΡΙΟΥ	ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΚΑΤΩ ΟΡΙΟΥ
(in) (mm)	(gr)	(gr)	(%)		
3/8"	9,52	0,0	100,0	100	100
No 4	4,75	0,0	99,9	100	90
No 8	2,36	0,0	71,2	90	65
No 16	1,18	0,0	47,8	70	45
No 30	0,6	0,0	32,1	50	30
No 50	0,3	0,0	20,5	30	18
No 100	0,149	0,0	15,3	21	10
No 200	0,075	0,0	12,9	15	5
ΠΑΙΠΑΛΗ	0,0				
ΟΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	0,0				

Αντίστοιχα, για μίγμα microsurfacing τύπου II, το οποίο μάλιστα χρησιμοποιήθηκε στη συντήρηση του τάπητα του αεροδρομίου Θεσσαλονίκης ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ (2003), τα όρια και η κοκκομετρική ανάλυση του μίγματος φαίνονται στον Πίνακα 5 και το Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 3: Όρια και κοκκομετρική ανάλυση μίγματος microsurfacing

- *Ασφαλτικό γαλάκτωμα*

Το ασφαλτικό γαλάκτωμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των ψυχρών ταπήτων (micro-surfacing) ήταν ένα τροποποιημένο με πολυμερή γαλάκτωμα τύπου CSS-1H σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM D 2397. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου γαλακτώματος.

Πίνακας 6: Ιδιότητες τροποποιημένου ασφαλτικού γαλακτώματος	
Δοκιμές στο γαλάκτωμα	Αποτελέσματα
1. Κινηματικό ιξώδες, Saybolt Furol @ 25°C, s	25
2. Δοκιμή σταθερότητας σε αποθήκευση, 24h, %	0,5
3. Έλεγχος φορτίου σωματιδίων	θετικό
4. Δοκιμή κοσκίνου, %	0,03
5. Στερεό υπόλειμμα @ 138°C, %	63,1

- *Παιπάλη - Νερό*

Η απαιτούμενη παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη ήταν το κοινό τσιμέντο Portland ενώ το νερό ήταν πόσιμο χωρίς επιβλαβή άλατα και οργανικά υλικά.

- *Τροποποιητές και πρόσθετα*

Ο τροποποιητής ασφάλτου(latex) που χρησιμοποιήθηκε επιλέχθηκε ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις των προδιαγραφών ASTM D 2397 και ISSA A 143. Αναφορικά με τα χημικά πρόσθετα, εκτός από αυτά που προστίθενται στο γαλάκτωμα κατά την παραγωγή του, επιπλέον πρόσθετα χρησιμοποιούνται κατά την διάστρωση, που συνήθως αναμιγνύονται με το νερό.Ο σκοπός της χρησιμοποίησης των προσθέτων αυτών είναι η ρύθμιση του χρόνου διάσπασης του γαλακτώματος και η αύξηση της πρόσφυσης της ασφάλτου στο αδρανές.

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Καθορισμός βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου (ISSA, Recom. 2001)

Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου διενεργήθηκαν οι δοκιμές της υγρής απότριψης και του φορτωμένου τροχού (Loaded Wheel Test). Από τις δοκιμές αυτές και σύμφωνα με τη μέθοδο του γραφικού προσδιορισμού του βέλτιστου ποσοστού ασφάλτου προέκυψαν τα εξής βέλτιστα ποσοστά ασφάλτου για κάθε τύπο λεπτοτάπητα:

Τύπος II: 5,5% ασφαλτος κατά βάρος ξηρού αδρανούς

Τύπος III: 4,5% ασφαλτος κατά βάρος ξηρού αδρανούς

Δοκιμές σύνθεσης

Ένας μεγάλος αριθμός συνθέσεων και δοκιμών με διάφορα ποσοστά τσιμέντου, νερού και προσθέτων παρασκευάστηκαν για τους τύπους II και III. Παρακάτω στον Πίνακα 7 παρατίθενται οι συνθέσεις ανά τύπο αδρανούς και οι δοκιμές των μιγμάτων των δυο τύπων σύμφωνα με ISSA, (Recom. 2001).

Προτεινόμενη μελέτη σύνθεσης

Συμπερασματικά από τα παραπάνω, και λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές και κλιματολογικές συνθήκες της νησιωτικής και ηπειρωτικής με χαμηλό υψόμετρο Ελλάδας, προτείνουμε τις συνθέσεις του Πίνακα 8, ανάλογα με τον τύπο του αδρανούς.

Πίνακας 7 : Συνθέσεις ανά τύπο αδρανούς

Υλικά	Τύπος II	Τύπος III
Σκωρία (g)	100	100
Τσιμέντο (g)	0,3	1
Νερό (g)	6,5	5,5
Γαλάκτωμα (g)	9	7,5
Χρόνος διάσπασης (m's'')	2' 56''	2' 43''
Ευστάθεια κώνου (cm)	2,6	2,6
Χρόνος ανάκτησης συνοχής (αριθμός επανάληψης)	8	8
Υγρή απότριψη (g)	289	442
Υγρή απογύμνωση αδρανών	97	95
Πλευρική μετατόπιση (%)	4,3	4,0
Περίσσεια ασφάλτου	388	370

Πίνακας 8 : Προτεινόμενη μελέτη σύνθεσης

Υλικά	Τύπος II	Τύπος III
Σκωρία (g)	100	100
Γαλάκτωμα (g)	8,5-9,5	7,0-8,0
Νερό (g)	6,5-7,0	5,5-6,0
Τσιμέντο (g)	0,3-1,0	1,0-1,5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ MICROSURFACE(II,III) ΜΕ ΣΚΩΡΙΑ

Ήδη στον Ελλαδικό χώρο το σύστημα microsurfacing με σκωρία έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε διάφορα αεροδρόμια (Χανίων, Πάρου, Θεσ/νίκης) αλλά και σε αυτοκινητοδρόμους (ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ). Τα ειδικά χαρακτηριστικά της σκωρίας, η καλή συνεργασία με το τροποποιημένο με πολυμερή ασφαλτικό γαλάκτωμα δίνουν μίγματα με υψηλούς δείκτες αντιολίσθησης. Μετρήσεις με το Βρετανικό εκκρεμές[ASTM E 303] έδειξαν τιμές αντίστασης σε ολίσθηση(SRV) άνω του 60 ύστερα από 6 μήνες από την εφαρμογή microsurfacing με σκωρία. Στις φωτογραφίες 1 και 2 φαίνονται σχετικά παραδείγματα εφαρμογών.



Φωτογραφία 1: Εφαρμογή microsurfacing με σκωρία τύπου II (αεροδρόμιο Θεσ/νίκης 2004)



Φωτογραφία 2: Εφαρμογή microsurfacing με σκωρία τύπου III (ΠΑΘΕ, 460° χλμ Ε.Ο.Αθήνα- Θεσ/νίκης 2005)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος microsurfacing για συντήρηση και αύξηση της αντιστοιχισιμότητας των επιφανειών κυκλοφορίας γίνεται πιο αποτελεσματική με τη χρήση μεταλλουργικής σκωρίας σε αντικατάσταση του αδρανούς υλικού. Με βάση διάφορες εργαστηριακές συνθέσεις αλλά και την εμπειρία από την εφαρμογή τέτοιων μιγμάτων προτείνονται οι δυο βασικοί τύποι microsurfacing με σκωρία για οδοστρώματα(τύπου III) και τάπητες αεροδρομίων(τύπος II). Στην πρόταση περιλαμβάνονται τα ποσοστά σκωρίας, φίλλερ, νερού και ειδικού τροποποιημένου με πολυμερή γαλακτώματος αλλά και αποτελέσματα-οδηγοί για τον έλεγχο των μιγμάτων microsurfacing με σκωρία. Στα πλαίσια της έρευνάς μας για τη χρήση σκωρίας σε μίγματα microsurfacing και με βάση παλαιότερες δημοσιεύσεις (Nikolaides A., Oikonomou N., 2000) θα γίνουν συνθέσεις μιγμάτων microsurfacing με τη χρήση σκωρίας σε αντικατάσταση των αδρανών με τη σύγχρονη χρήση ιπτάμενης τέφρας σε αντικατάσταση τσιμέντου.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. ΑΕΙΦΟΡΟΣ Α.Ε., Θεσσαλονίκη, www.aeiforos.gr
2. AASHTO M 316-96 (1998) Polymer Modified Cationic Emulsified Asphalt, Standard Specifications for Transportation Materials and methods of Sampling and Testing, Part I, Specifications
3. AKTIS S.A., Θεσσαλονίκη, aktis_sa@tee.gr
4. ASTM D 2397 (1996) Standard Specification for Cationic Emulsified Asphalt, Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol.04.03, Road and Paving Materials
5. ASTM D 3910 (1996) Design, Testing and Construction of Slurry Seal, Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Vol.04.03, Road and Paving Materials
6. ASTM E 303(1996) , Standard Test method for Measuring Surface friction, properties using the British Pendulum Tester, Section 4, Vol.04.03
7. BITOUMINA S.A., Θεσσαλονίκη, bitumina@otenet.gr
8. ISSA (2001) International Slurry Seal Association, Washington D.C., “what is microsurfacing”, www.slurry.org
9. ISSA (2001) Recommended Performance, Guidelines for Microsurfacing A143
10. Khan M.I., Wohhab Al-Abdul H.I.(1998) Improving slurry seal performance in Eastern Saudi Arabia using steel slag, Construction and Building Materials 12, pp.195-201
11. Nikolaides A., Oikonomou N. (2000) The use of fly ash as a substitute of cement in microsurfacing, Moscow 2000, International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, U.K.